



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

# Modelación del flujo en la zona no saturada. Aplicación a una parcela experimental (Cali, Colombia)

Treball realitzat per:

**Maria Elvira García Gisbert**

Dirigit per:

**Lucila Candela Lledó**

Grau en:

**Enginyeria Civil**

Barcelona, gener 2017

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

**TREBALL FINAL DE GRAU**



## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer la colaboración durante la última década a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. Sobre todo el interés en facilitar los datos registrados en la parcela seleccionada y los estudios derivados de las muestras del suelo.

A Cenicaña y el Ingenio de Manuelita S. A. por permitir el desarrollo de este proyecto, analizando la evolución del cultivo y controlando la aplicación de fertilizantes, así como ceder el espacio de la parcela experimentada.

A el Centre de Cooperació per al Desenvolupament-CCD de la UPC por el apoyo al proyecto.

A Lucila Candela, por su dedicación constante, sus consejos y recomendaciones a lo largo de todo el trabajo que me han guiado y formado en la ámbito de la ingeniería del terreno.

A mi familia, por la confianza y el apoyo que me han brindado durante la realización de este proyecto y a lo largo de todo el grado. Sin vuestro impulso no habría sido posible llegar donde estoy.

A mis amigos, por la atención y los ánimos prestados dentro y fuera de la universidad.

A Álvaro, por su paciencia y la energía transmitida durante tantos años, llevándome siempre a superarme y avanzar.

## RESUMEN

El estudio de la zona no saturada (ZNS) es de vital importancia para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación por actividades agrícolas, urbanas e industriales. El análisis del flujo de agua a través de la zona vadosa permite determinar el transporte de reactivos susceptibles de alcanzar la zona freática y contaminar las aguas subterráneas.

El objetivo del estudio es la modelación del flujo en la zona no saturada en una parcela experimental instrumentada. Dicha parcela está situada en el Valle del Cauca, Colombia, y se halla cultivada con caña de azúcar. Para su producción se emplean fertilizantes a base de vinaza los cuales pueden afectar a las zonas inferiores del suelo y, en consecuencia, derivar al acuífero. Por ello, la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) ha monitoreado la parcela con tensiómetros para la medida de la succión desde 2006. Además, se han obtenido muestras inalteradas del terreno que han permitido caracterizar la zona de estudio y construir el modelo conceptual para su posterior simulación.

La simulación del flujo de agua se ha realizado con el código HYDRUS-1D. El programa numérico se basa en van Genuchten para simular el flujo y usa el método de Penman-Monteith para el cálculo de la evapotranspiración de las plantas. El modelo consta de tres capas y en su totalidad se han modelado 100 cm de la ZNS. El período simulado es de 20/6/2008 a 4/5/2009.

Se han realizado numerosos ajustes de los parámetros introducidos en el modelo, pero la simulación obtenida, aunque refleja la tendencia observada, sobreestima los datos observados. Esta diferencia puede ser atribuible a medidas erróneas de los datos in situ, posible ascensión capilar o encharcamiento en el cultivo.

**Palabras clave:** modelación flujo, zona no saturada, Valle del Cauca, caña de azúcar, contaminación de acuíferos, HYDRUS.

## ABSTRACT

The study of the unsaturated zone is of vital importance to assess the vulnerability of aquifers to pollution by agricultural, urban and industrial activities. The analysis of the water flow through the vadose zone allows to determine the transport of reagents that are likely to reach the water table and contaminate the groundwater.

The objective of the study is to model the flow in the unsaturated zone in an instrumented experimental plot. The plot is located in Valle del Cauca, Colombia, and is cultivated with sugar cane. For their production they use vinasse-based fertilizers that can affect the lower layers of the soil and reach the aquifer. Therefore, the Valle del Cauca Corporation (CVC) has monitored the plot with suction tensiometers for the measurement of suction since 2006. In addition, unaltered soil samples have been obtained to characterize the study area and create a conceptual model for its following simulation.

The water flow simulation was performed using the HYDRUS-1D code. The numerical program is based on van Genuchten to simulate the flow and uses the Penman-Monteith method to calculate the evapotranspiration of plants. The model consists of three layers and in its entirety has been modeled 100 cm of the vadose zone. The simulated period is from 20/6/2008 to 4/5/2009.

Numerous adjustments have been made to the parameters introduced in the model, but the simulation obtained, although reflecting the observed tendency, overestimates the observed data. This difference can be attributed to erroneous measurements of the in situ data, possible capillary ascent or ponding in the culture.

**Key words:** water flow model, unsaturated zone, Valle del Cauca, sugar cane, aquifer contamination, HYDRUS.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	9
1.1 Objetivos .....	9
1.2 Metodología .....	10
1.3 Contexto regional de la zona de estudio .....	10
2. LA ZONA NO SATURADA .....	13
2.1.1 Relación suelo-agua-aire .....	14
2.1.2 Relación suelo-agua-planta.....	16
3. ÁREA DE ESTUDIO.....	18
3.1 Características regionales .....	18
3.2 Parcela experimental .....	19
3.2.1 Características de la zona no saturada: espesor y suelos .....	19
3.2.2 Características físicas e hidráulicas .....	21
3.3 Modelo conceptual de la zona no saturada .....	23
4. METODOLOGÍA .....	24
4.1 Instrumentación del área experimental .....	24
4.2 Obtención y análisis de los datos.....	26
4.2.1 Datos meteorológicos .....	26
4.2.2 Riego con vinaza .....	27
4.2.3 Cultivo de caña de azúcar .....	28
4.2.4 Zona no saturada .....	30
4.3 Base teórica del modelo numérico.....	32
4.3.1 Ecuación del flujo en medio no saturado .....	32
4.3.2 Captación de agua por las raíces.....	33
4.3.3 Parámetros hidráulicos .....	33
4.3.4 Condiciones iniciales.....	34
4.3.5 Condiciones de contorno .....	34
4.3.6 Método numérico .....	35
4.4 Bondad de ajuste .....	35
5. MODELACIÓN.....	36
5.1 Elaboración del modelo conceptual y numérico .....	36
5.1.1 Geometría.....	37
5.1.2 Discretización espacial .....	38
5.1.3 Discretización temporal.....	38
5.1.4 Criterios de iteración .....	39
5.1.5 Propiedades hidráulicas del suelo: modelo y parámetros.....	39

5.1.6 Absorción a través de las raíces.....	39
5.1.7 Crecimiento de la planta.....	40
5.1.8 Condiciones iniciales y condiciones de contorno .....	41
5.1.9 Simulación inicial.....	43
5.2 Calibración.....	44
5.2.1 Estimación mediante modelo inverso .....	45
5.2.2 Ajuste de sensibilidad.....	46
5.2.3 Calibración manual.....	47
5.2.4 Calibración automática.....	47
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	48
7. CONCLUSIONES .....	55
7.1 Trabajo futuro.....	56
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	58
ANEJOS.....	60
ANEJO A. DATOS DISPONIBLES .....	61
ANEJO B. MODELACIÓN EN HYDRUS-1D .....	62
ANEJO C. ARCHIVOS HYDRUS-1D.....	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1: Esquema general de la obtención del etanol en destilería (CVC, 2012).	11
Figura 2. 1: Esquema simplificado de los procesos de la ZNS (Tindall et al., 1999).	13
Figura 2. 2: Curva de retención con histéresis (Candela et al., 1993).	15
Figura 2. 3: Conductividad hidráulica en función del potencial del agua en el suelo $ h $ (Candela et al., 1993).	16
Figura 3. 1: Acuífero del río Cauca (Ortegón et al., 2016).	18
Figura 3. 2: Área de estudio, características geológicas y situación de las parcelas experimentales (Ortegón et al., 2016).	19
Figura 3. 3: Puntos de monitoreo Hacienda Real (CVC, 2012); VP-PM, son pozos de monitoreo, VP-PZ piezómetros y R permeámetros.	20
Figura 3. 4: Perfil litológico Hacienda Real (CVC, 2012).	20
Figura 3. 5: Descripción suelos Hacienda Real (CVC, 2012).	21
Figura 3. 6: Distribución del tamaño de poros (%) Hacienda Real (CVC, 2012).	21
Figura 3. 7: Curva de retención Hacienda Real (CVC, 2012).	22
Figura 3. 8: Conductividad hidráulica en laboratorio Hacienda Real (CVC, 2012).	22
Figura 3. 9: Modelo conceptual ZNS de Hacienda Real.	23
Figura 4. 1: Detalle de cápsula porosa entre el tensiómetro y el suelo (Candela et al., 1993).	24
Figura 4. 2: Tipo de tensiómetro en Hacienda Real (CVC, 2012).	25
Figura 4. 3: Colocación de lisímetros y tensiómetros Hacienda Real (CVC, 2012).	25
Figura 4. 4: Período de calibración del modelo.	26
Figura 4. 5: Datos registrados de temperatura y de precipitación en el período de estudio.	27
Figura 4. 6: Sistema radical de la caña de azúcar (Amaya et al., 1995).	28
Figura 4. 7: Distribución radical de la caña de azúcar (Amaya et al., 1995).	29
Figura 4. 8: Variación de la población y la altura de la planta de caña en función de su edad (Amaya et al., 1995).	29
Figura 4. 9: Succión observada en los tensiómetros a 30, 60 y 90 cm de profundidad.	31
Figura 4. 10: Esquema de la función respuesta al estrés hídrico, $\alpha(h)$ , propuesto por Feddes et al. (1978) (Šimůnek et al., 2013).	33
Figura 5. 1: Ventana Main Processes de HYDRUS-1D.	36
Figura 5. 2: Ventana Geometry Information de HYDRUS-1D.	37
Figura 5. 3: Definición de las capas de diferentes materiales en la ventana Profile Information de HYDRUS-1D.	37
Figura 5. 4: Definición de los puntos de observación en la ventana Profile Information.	38
Figura 5. 5: Ventana Time Information de HYDRUS-1D.	38
Figura 5. 6: Ventana Hydraulic Model de HYDRUS-1D.	39
Figura 5. 7: Ventanas Root Water Uptake - Model y Parameters de HYDRUS-1D.	40
Figura 5. 8: Esquema de la función potencial de la distribución de absorción de agua en la zona de raíces (Šimůnek et al., 2013).	41
Figura 5. 9: Comparativa entre la distribución de Hoffman y la distribución logNormal en el cálculo de la distribución de las raíces en el suelo (Candela et al., 2016).	41
Figura 5. 10: Ventana Boundary Conditions de HYDRUS-1D.	42
Figura 5. 11: Ventana Meteorological Parameters de HYDRUS-1D.	43
Figura 5. 12: Valores de precipitación y resultados obtenidos de la simulación inicial.	44
Figura 5. 13: Ventana Inverse Solution de HYDRUS-1D.	45
Figura 5. 14: Ventana Data For Inverse Solution de HYDRUS-1D.	46
Figura 5. 15: Intervalos de los parámetros hidráulicos en el modelo inverso.	47



Figura 6. 1: Valores de precipitación y resultados obtenidos del modelo calibrado manualmente. ....	48
Figura 6. 2: Nuevos parámetros de Feddes. ....	49
Figura 6. 3: Valores de precipitación y resultados obtenidos del modelo calibrado manualmente con los parámetros de Feddes modificados. ....	50
Figura 6. 4: Valores de precipitación y resultados obtenidos del modelo calibrado automáticamente con los parámetros de Feddes modificados. ....	52
Figura 6. 5: Recarga acumulada (en cm) durante el período calibrado. ....	53
Figura A. 1: Disponibilidad de los datos meteorológicos, succión medida con tensiómetros y fechas de aplicación del riego con vinaza. ....	61
Figura B. 1: Definición de la discretización espacial en la ventana Profile Information de HYDRUS-1D. ....	62
Figura B. 2: Ventana Print Information de HYDRUS-1D. ....	62
Figura B. 3: Ventana Print Times de HYDRUS-1D. ....	63
Figura B. 4: Ventana Iteration Criteria de HYDRUS-1D. ....	63
Figura B. 5: Ventana Root Growth Parameter de HYDRUS-1D. ....	63
Figura B. 6: Condiciones iniciales de presión matricial. ....	64

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1: Concentración máxima, mínima y media de la composición de la vinaza (Ortegón et al., 2016). .....	11
Tabla 4. 1: Fechas del riego con vinaza y dosis de aplicación (Cenicaña, 2006-2011).....	27
Tabla 4. 2: Datos del ciclo de la caña de azúcar en la parcela experimental proporcionados por Cenicaña.....	30
Tabla 4. 3: Parámetros de van Genuchten obtenidos por CVC (CVC, 2012). .....	31
Tabla 4. 4: Parámetros de van Genuchten obtenidos en el laboratorio de la UPC en 2015 (Candela et al., 2016). .....	31
Tabla 5. 1: Parámetros hidráulicos introducidos para la simulación inicial. ....	39
Tabla 5. 2: Condiciones de contorno en la superficie del suelo. Datos diarios, 490 registros de cada variable. ....	42
Tabla 5. 3: Datos modificados del crecimiento de la caña de azúcar. ....	46
Tabla 5. 4: Parámetros hidráulicos obtenidos en la calibración manual. ....	47
Tabla 6. 1: Estadísticos del modelo calibrado manualmente. ....	49
Tabla 6. 2: Estadísticos del modelo calibrado manualmente con los parámetros de Feddes modificados.....	51
Tabla 6. 3: Valores de $\alpha$ , K y n obtenidos en la calibración automática. ....	51
Tabla B. 1: Datos introducidos en el modelo respecto el crecimiento de la caña de azúcar.....	64

## **1. INTRODUCCIÓN**

La contaminación de las aguas subterráneas es un problema creciente en todo el mundo. El vertido de aguas residuales industriales o urbanas y el uso indebido de fertilizantes puede afectar a su calidad y cantidad.

La zona no saturada, o vadosa, del suelo (Candela et al., 1993) es el medio de paso entre la superficie y el acuífero. Es muy importante la evaluación de los procesos de flujo de agua y transporte de solutos que en ella se desarrollan ya que su investigación es una herramienta básica para poder diseñar políticas de protección ambiental y concienciación pública.

Dado que la zona no saturada constituye el principal medio para la recarga del acuífero, necesita de una instrumentación específica para la obtención de parámetros del terreno y registros en campo. Para estudiar el material geológico que la compone, el movimiento del agua o el transporte de contaminantes se requiere usar técnicas generalmente destructivas y hacer un seguimiento de determinados parámetros durante un período de tiempo más o menos extenso.

El presente estudio constituye la primera fase de una investigación que analiza los procesos de flujo y la recarga en la zona vadosa de una parcela experimental cultivada con caña de azúcar en Colombia. Para ello, se disponen de datos hidrológicos y equipos de monitoreo para analizar la evolución del estado del agua en el suelo. Se deben considerar, además, otros factores que afectan a la generación y a la extracción del agua del suelo como son los registros climáticos o el ciclo de crecimiento y desarrollo de la caña de azúcar y sus raíces.

En una siguiente fase está previsto el estudio de los procesos del transporte reactivo derivado de la aplicación de fertilizantes de vinaza en el cultivo de dicha parcela. Esta fase no se ha descrito en el presente documento ya que forma parte de un trabajo de investigación complejo que partiría de las bases iniciales propuestas en este informe.

El proyecto tiene un gran interés científico e internacional puesto que la investigación se centra en caracterizar la vulnerabilidad del acuífero, establecer unas líneas de actuación que permitan conocer el flujo del agua y disponer de unos patrones de monitoreo de la calidad del agua. Además, constituye un trabajo de colaboración internacional y de cooperación entre distintas entidades para el estudio de la zona no saturada.

### **1.1 Objetivos**

El transporte de los contaminantes a través de la zona vadosa hasta la zona saturada se produce con el flujo de agua. Es por eso, que la primera fase para la evaluación del acuífero es conocer el modelo conceptual del movimiento del agua a través del medio poroso y determinar la recarga producida en la zona saturada.

La siguiente fase del proyecto requiere la realización de un modelo de flujo calibrado a partir de los datos registrados en campo. De este modo, con un modelo de flujo consistente se puede medir y evaluar la recarga y el tiempo de tránsito para, en una última fase, desarrollar el modelo de transporte de solutos y material contaminante.

Los objetivos planteados en el presente trabajo son los que conciernen a la primera fase del proyecto. Para ello, se pretende:

- Elaborar un modelo numérico que permita simular el flujo de agua en la zona no saturada de la parcela experimental.
- Calibrar el modelo a los datos reales obtenidos en campo en el período de tiempo seleccionado.
- Evaluar la recarga al acuífero.

## **1.2 Metodología**

El proceso que se ha seguido para poder cumplir con los objetivos propuesto ha sido:

1. Analizar los datos disponibles de una parcela experimental instrumentada y los factores implicados en el flujo de agua en la zona no saturada: seleccionar y depurar la información y los datos necesarios para elaborar el modelo.
2. Paralelamente, revisar los estudios y publicaciones previos realizados en el ámbito del presente trabajo así como en el área experimental en cuestión.
3. Desarrollar el modelo conceptual y la geometría del perfil a partir del análisis de los datos disponibles.
4. Elaborar el modelo de flujo de agua en la zona no saturada mediante el programa HYDRUS-1D, versión 4.16 (Simunek, J et al., 2013).
5. Calibrar el modelo generado por HYDRUS.
6. Analizar y discutir los resultados obtenidos.

## **1.3 Contexto regional de la zona de estudio**

En los últimos veinte años el cultivo de la caña de azúcar en Colombia ha crecido exponencialmente. El uso principal de la caña de azúcar es como producto alimentario, aunque también se usa para obtener productos de alcohol, como el etanol y el ácido acético. La producción del alcohol aparece en Colombia como un nuevo negocio que aporta sostenibilidad al sector azucarero, a su área de influencia y, además, ofrece nuevas posibilidades al sector agropecuario en general. El etanol o alcohol carburante es un combustible obtenido de la fermentación de la planta de azúcar. Al ser un producto proveniente de recursos renovables y con un nivel bajo en carbono es un producto idóneo para usarse como oxigenante en las gasolinas y reducir la contaminación que producen los motores de combustión interna (CVC, 2012).

El Congreso de la República Colombiana expidió la Ley 693 de septiembre de 2001 para promover la destilación de la caña de azúcar y la producción del etanol. Uno de los principales objetivos de esta ley es implementar un uso más respetuoso del medio ambiente del combustible de motor estableciendo que las gasolinas contengan un 10% de alcohol carburante. Desde ese instante, el cultivo de la caña de azúcar se extendió en todo el territorio, llevando a inaugurarse en 2005 la primera planta productora de alcohol carburante. En 2012 ya eran cinco los ingenios que habían instalado destilerías en sus plantas, con una capacidad de producción de un millón cincuenta mil litros diarios (CVC, 2012). La Figura 1.1 muestra un esquema general de la obtención del etanol en destilería.

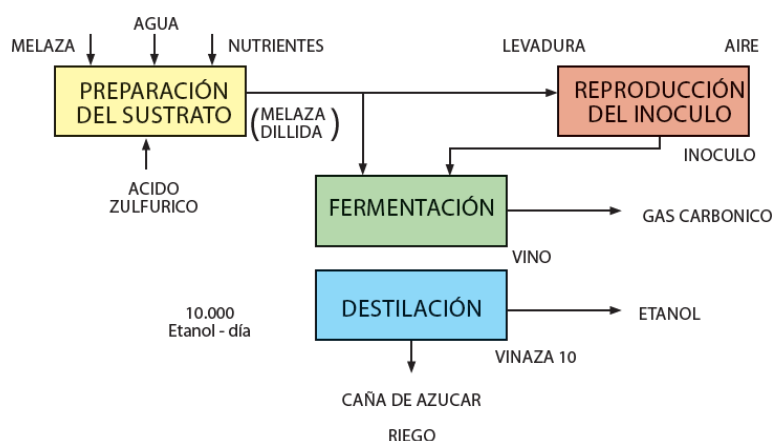


Figura 1. 1: Esquema general de la obtención del etanol en destilería (CVC, 2012).

La creciente producción de bioetanol en las refinerías de caña de azúcar en el sud-oeste de Colombia ha provocado un aumento de producción de vinaza. La vinaza es un subproducto sólido o líquido de color marrón oscuro obtenido de la destilación del alcohol en proporciones que pueden variar desde 1 hasta 14 litros de vinaza por litro de alcohol anhidro (CVC, 2012). Las propiedades varían de acuerdo con el proceso de obtención del alcohol y de su tratamiento, pero es importante controlar el proceso de la vinaza puesto que se usa como fertilizante en los campos de caña de azúcar.

La aplicación de vinaza a gran escala es una alternativa económica efectiva para la irrigación y fertilización de la caña de azúcar, debido a su alto nivel de potasio, calcio y materia orgánica en su composición química, así como cantidades moderadas de nitrógeno y otros nutrientes. Tiene un contenido total de sólidos, del 2 al 4% cuando se obtiene del jugo de la caña de azúcar y del 5 al 10% cuando se obtiene de la melaza. La composición es variable, mayoritariamente de componentes orgánicos e iones, su pH es bajo ( $\sim 5$ ) y la demanda química de oxígeno (QOD) es elevada (Ortegón et al., 2016). En la Tabla 1.1 se muestra la concentración máxima, mínima y media de la composición de la vinaza.

Tabla 1. 1: Concentración máxima, mínima y media de la composición de la vinaza (Ortegón et al., 2016).

Parameter	Min-max	Mean	Groundwater (2004)
pH	3.98–5.1	4.7	6.8–7.6
EC ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	14,350–64,099	32,803	543–1,120
TDS ( $\text{mg L}^{-1}$ )	117,416–599,400	358,578	458–702
QOD ( $\text{mg O L}^{-1}$ )	170,757–60,1832	35,0811	2.4–3.4
Hardness ( $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ )	7,498–50,667	22,469	380–564
$\text{HCO}_3^-$ ( $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ )	1,098–23,302	8,875	312–620
$\text{SO}_4^{2-}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	8,901–35,670	21,276	25.4–124
$\text{Cl}^-$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	271–13,980	7,041	7.1–21
$\text{NO}_3^-$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	39–10,247	2,971	6–1.7
$\text{PO}_4^-$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	8.7–297	167	0.0–0.1
$\text{Na}^+$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	90.7–1,671	942	10.7–26
$\text{K}^+$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	4,698–46,950	19,515	0.8–1.6
$\text{Ca}^{2+}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	879–10,133	4,316	45–114
$\text{Mg}^{2+}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	1,272–6,080	2,818	34–89
Fe ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0.5–21,125	4,286	<0.2
Cr ( $\text{mg L}^{-1}$ )	50.6	–	–
Ni ( $\text{mg L}^{-1}$ )	3.8	–	–
Mn ( $\text{mg L}^{-1}$ )	23–6,410	2,146	–
Phenol ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0.0–4.8	2.6	<0.01

Se debe considerar que el uso de la vinaza como fertilizante podría afectar a la calidad del suelo, el agua y a la producción de la caña de azúcar. La información sobre los posibles impactos de la aplicación de la vinaza es limitada ya que se han hecho pocos experimentos hasta la fecha. Algunos ensayos han mostrado que la aplicación de la vinaza no afecta negativamente al pH del suelo ni a la salinidad aunque aumenta levemente el carbono orgánico del suelo y el potasio intercambiable. Otros ensayos han detectado flujo de nitratos o, incluso, una disminución de la conductividad hidráulica saturada y no saturada (Ortegón et al., 2016). Sin embargo, se han obtenido algunas conclusiones derivadas de ensayos de infiltración realizados por los ingenios azucareros en los suelos más representativos del Valle del Cauca: es importante conocer las propiedades para describir el movimiento del agua en el suelo; se presenta una baja velocidad de infiltración en suelos arcillosos; en suelos considerados altamente permeables se deben disminuir las dosis a aplicar; y la permeabilidad de los suelos va directamente ligada a la vulnerabilidad de los acuíferos (CVC, 2012).

Respecto al efecto de la vinaza sobre la caña de azúcar, se han constatado problemas en la calidad de la materia prima con el uso irracional del derivado, sobre todo un atraso en el ciclo de madurez, reducción en el contenido de sacarosa del jugo y un incremento en la producción de cenizas que ocasiona dificultades en la cristalización del azúcar. El uso racional de la vinaza, en cambio, incrementa los rendimientos agroindustriales cuando las características de los suelos son favorables para su incorporación, sobre todo la presencia de un buen drenaje superficial e interno y que este sea deficiente o no disponible a las plantas en potasio, calcio y materia orgánica, principalmente (Chaves, 1985).

Actualmente, el marco legal de Colombia no incluye medidas específicas para implementar prácticas agrícolas contra la contaminación de los recursos hídricos o del suelo proveniente de la vinaza. Las regulaciones específicas existentes en el Valle del Cauca las ha desarrollado la administración local Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca-CVC, a partir del estudio realizado en parcelas semicomerciales aplicando diferentes dosis de fertilizantes elaborados con vinaza (CVC, 2012).

Los siguientes apartados pretenden describir el análisis realizado en una de las parcelas experimentales del Valle del Cauca (parcela Hacienda Real) y el estudio del flujo del agua y de la vinaza aplicada a través de la zona no saturada. Se detallarán las características de la zona de estudio, los procesos que se desarrollan en ella, el método de obtención de datos en campo y las consideraciones realizadas para llevar a cabo el modelo conceptual que simulará el movimiento del fluido.

Este estudio se ha llevado a cabo por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia, la Universitat Politècnica de Catalunya y la Universidad Politécnica de Alicante.

## 2. LA ZONA NO SATURADA

En este apartado se explican de forma sucinta los aspectos teóricos más relevantes de la zona no saturada, los procesos que en ella se desarrollan y la relación entre los constituyentes del medio.

Se puede definir la zona no saturada (en adelante, ZNS) como el espacio del suelo comprendido entre la superficie y la zona saturada (en adelante, ZS), es decir, la superficie freática. En general, es una zona de transición entre el sistema hidrológico superficial y el subterráneo, por lo que su caracterización es muy importante para el análisis y estudio de la transferencia de flujo y contaminantes entre ambas zonas.

La ZNS abarca diversas disciplinas científicas y áreas de estudio, cada una interesada en cuestiones muy específicas de esta porción del terreno. Esta perspectiva tan dividida ha provocado que no se haya llevado a cabo un análisis completo de la ZNS y que exista una carencia de investigación teórica y experimental en este ámbito.

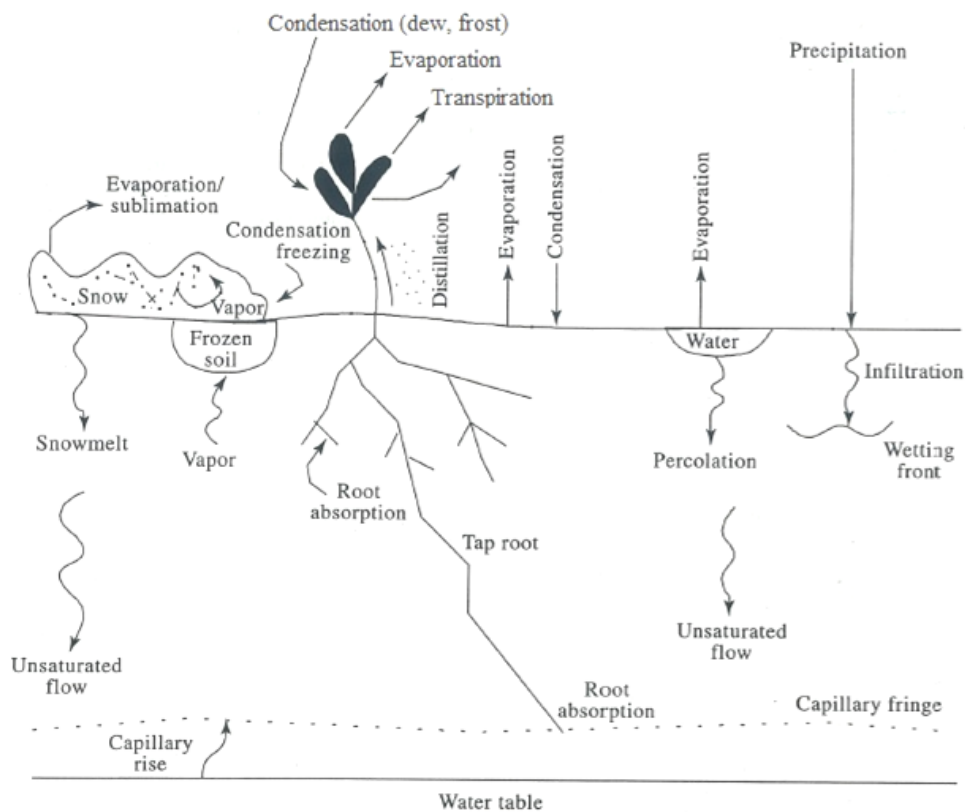


Figura 2. 1: Esquema simplificado de los procesos de la ZNS (Tindall et al., 1999).

Se diferencian tres subzonas en la ZNS: una subzona superior, que se relaciona con los procesos atmosféricos y superficiales del terreno; una subzona intermedia, de espesor muy variable y límites poco definidos; y una subzona inferior, llamada franja capilar, que se sitúa en el límite superior de la superficie piezométrica.

El suelo vegetal se situaría en la subzona superior. En esta capa se desarrollan los procesos físico-químicos y biológicos, además del crecimiento de las raíces que condicionan el contenido de agua. La porosidad y la permeabilidad suelen ser mayores en esta subzona que en las

subyacentes. Está formada por material de alteración de las rocas y materia orgánica puesto que es donde se llevan a cabo las actividades agrícolas. El movimiento del agua a través de ella ocurre principalmente por infiltración, percolación, redistribución y evaporación (Tindall et al., 1999).

La franja capilar constituye el límite entre la ZNS y la ZS. En el límite inferior se encuentra la superficie freática que tiene condiciones de saturación y con presión hidráulica atmosférica, igual que el borde superior de la ZNS. El flujo puede ser vertical u horizontal, permitiendo el movimiento en la dirección del gradiente local del agua subterránea.

En la subzona intermedia el agua está bajo presión negativa (succión), además de que, en general, presenta la componente vertical del flujo como predominante ya sea ascendente o descendente. Ello no excluye que localmente se produzcan movimientos horizontales por procesos físicos o químicos.

### 2.1.1 Relación suelo-agua-aire

En la ZNS los poros están ocupados por aire y agua. Los poros mayores caracterizan la permeabilidad del suelo y los menores representan la capacidad de retención de agua del suelo. La proporción entre el agua y el aire en los poros cambia constantemente y puede modificar las propiedades hidráulicas del medio.

La energía del agua para moverse a través de los poros es principalmente potencial, dado que la energía cinética es muy pequeña debido al lento movimiento del agua en el suelo. La energía potencial está relacionada con la posición y la condición interna del agua, y da origen a su movimiento por diferencias de potencial total dirigiéndose a puntos de menor energía potencial. Consecuentemente, la fuerza que actúa sobre el agua del suelo es la resultante del gradiente de potencial (Tindall et al., 1999).

Dado que la ZNS está ligada a la fase sólida del suelo, el flujo del agua se controla por fuerzas capilares en condiciones de no equilibrio que incluyen la adhesión y atracción entre moléculas de distinta naturaleza (agua-suelo) y la cohesión entre moléculas de la misma clase (agua-agua). Se debe destacar que estas fuerzas actúan en sentido contrario a la gravedad y que ésta adquiere relevancia a medida que la humedad se extiende, aumentando también la conductividad hidráulica.

La presión del agua es menor que la atmosférica, por lo que el agua está bajo tensión. Los constituyentes de la energía potencial del agua por unidad de masa son los siguientes:

- Potencial gravitacional ( $\Psi_g$ ) : es la resultante de la fuerza de la gravedad, de valor negativo tomando como referencia la superficie.
- Potencial de presión ( $\Psi_m$ ) : es la resultante de las fuerzas entre la matriz del suelo y el agua por la acción de la tensión superficial, la atracción molecular y el intercambio iónico.
- Potencial osmótico: es el generado por la atracción iónica de los solutos por el agua, de valor negativo y de influencia limitada en el potencial total del agua.

El potencial de presión, también llamado succión capilar o tensión matricial, presenta valores negativos en la ZNS y su unidad es el bar (1 bar = 0.987 atmósferas = 1021 cm de agua a 15°C).



El potencial total del agua se expresa como la suma del potencial gravitacional y el potencial de presión. En términos de masa se expresaría como 2.1 y en términos de peso como 2.2.

$$\Psi = \Psi_g + \Psi_m = gz + p/\rho \quad (2.1)$$

$$\Phi = h = z + h_m \quad (2.2)$$

Donde,  $g$ , es la gravedad [ $\text{cm/s}^2$ ];  $z$ , es la cota del punto [ $\text{cm}$ ];  $p$ , es la presión entre el agua y el suelo [ $\text{g}/(\text{cm s}^2)$ ];  $\rho$ , es la densidad del agua [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ].

Puesto que las propiedades del suelo determinan su capacidad de retención de agua, el potencial matricial está relacionado con el contenido de humedad. La porosidad no es suficiente para definir el estado del suelo, por lo que se requiere de otros parámetros para determinarlo. El contenido volumétrico de agua ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ),  $\theta$ , es el grado de humedad del suelo, siendo cero si el suelo está completamente seco y el máximo de saturación,  $\Phi$ , si todos los poros están llenos.

Durante el humedecimiento del suelo, el agua rellena primero los poros mayores y se expande a los poros menores, aumentando  $\theta$  y disminuyendo la intensidad de la succión. En la Figura 2.2, se muestra la curva característica, también llamada curva de retención del suelo, que expresa la succión en función del contenido volumétrico.

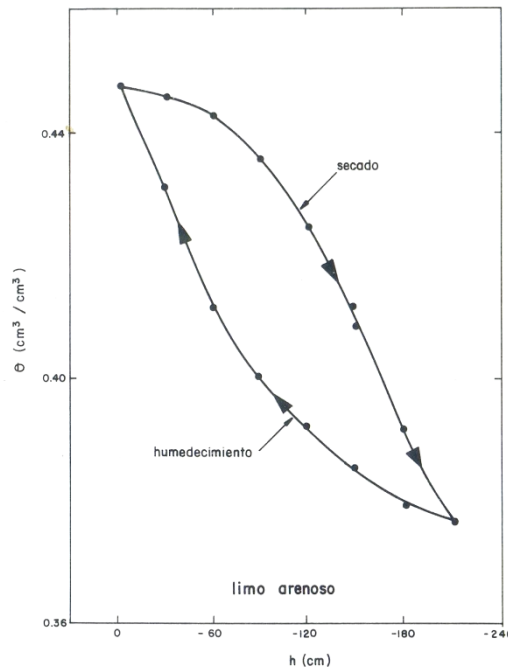


Figura 2. 2: Curva de retención con histéresis (Candela et al., 1993).

Debido a la histéresis, la curva de retención es diferente durante la fase de humedecimiento respecto la fase de secado. Por esto, el potencial ( $h$ ) muestra dos valores para el mismo contenido de humedad siendo menor en la fase de secado que en la de humedecimiento.

La conductividad hidráulica,  $K$ , depende directamente de las características del suelo y de las propiedades del fluido. En la ZNS, la conductividad hidráulica depende de la humedad del suelo y de la succión, puesto que para valores de humedad o succión bajos, la conductividad

hidráulica también es baja y el gradiente de succión requerido para producirse flujo de agua es muy elevado.

La conductividad hidráulica puede expresarse como una función no lineal del contenido de humedad,  $K(\theta)$ , o del potencial matricial,  $K(\Psi)$ . Estas dos variables independientes están relacionadas por una función no lineal. En consecuencia, las características de la ZNS están condicionadas a la conductividad hidráulica y al potencial de presión.

Autores como Mualem (1976) o van Genuchten (1980) han propuesto modelos distintos para estimar estas variables: Mualem utilizó la relación  $\theta/\Psi$  y el valor medio de  $K$  en saturación para predecir la función de la conductividad hidráulica,  $K$ ; mientras que van Genuchten propuso un modelo para relacionar el potencial,  $h$ , y el contenido de humedad,  $\theta$ .

### 2.1.2 Relación suelo-agua-planta

La conducción más efectiva del agua del suelo a la atmósfera es a través de las plantas. Las raíces son la principal resistencia del flujo del agua en el subsuelo puesto que a más densidad radicular mayor es la conductividad hidráulica que ejercen las raíces sobre el agua.

El suelo funciona como un depósito de agua donde el volumen de almacenamiento no es constante debido a pérdidas por infiltración o evaporación. La demanda de agua de la planta o de la atmósfera afecta significativamente a la disponibilidad de ésta en el suelo, ya que a mayor demanda, menor es la fracción volumétrica de agua en el suelo.

Las curvas características representan las propiedades del suelo que condicionan la capacidad de almacenamiento de agua de un suelo. En la Figura 2.3 se muestra la relación entre la conductividad hidráulica y el potencial de succión para dos tipos de suelo.

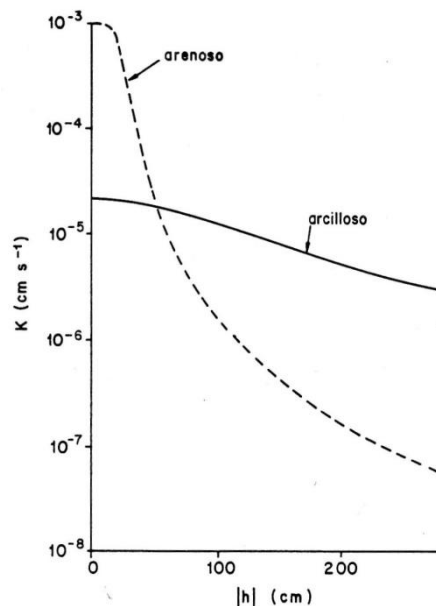


Figura 2. 3: Conductividad hidráulica en función del potencial del agua en el suelo  $|h|$  (Candela et al., 1993).

El contenido de agua en el suelo afecta directamente al desarrollo de la planta. Los déficits hídricos (potenciales hídricos bajos) pueden producirse por factores como un bajo contenido de

humedad en el suelo, alta resistencia hidráulica radicular o transpiración elevada. Estos déficits generan estrés hídrico a la planta traduciéndose en una reducción del consumo de agua, entre otros aspectos.

El análisis de la planta en el balance de agua del medio poroso es muy importante puesto que la evapotranspiración depende directamente de ella y es uno de los componentes principales de la pérdida de agua en el suelo. A su vez, el desarrollo de la planta depende de las condiciones de humedad del suelo y el efecto de la planta sobre el agua de la ZNS varía a lo largo del tiempo.

La evapotranspiración es la pérdida de agua hacia la atmósfera a través de la planta (transpiración) y a través de la superficie del suelo (evaporación). Depende principalmente de las condiciones meteorológicas del período de estudio y del estado de crecimiento del cultivo ya que éste afecta al grado de intercepción de radiación solar por la hojas.

Para estimar la evapotranspiración,  $ET$ , del cultivo se usa la expresión 2.3.

$$ET = K_c \cdot ET_0 \quad (2.3)$$

Donde,  $K_c$ , es un coeficiente de cultivo que depende del tipo de planta y de su estado de crecimiento; y  $ET_0$ , es la evapotranspiración de referencia que permite evaluar la demanda evaporativa del cultivo. Uno de los métodos más usados para estimar el valor de  $ET_0$  es el método de Penman-Monteith.

### 3. ÁREA DE ESTUDIO

Para el estudio del flujo de agua y del efecto de la vinaza en los acuíferos la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) estudió diez parcelas semicomerciales situadas en la zona cultivada del Valle del Cauca, Colombia. Para proporcionar muestras representativas, se seleccionaron las áreas correspondientes a las zonas de recarga del acuífero, presencia de nivel freático alto, vulnerabilidad a la contaminación, tipos de suelos, ausencia de focos de contaminación aguas arriba del área y estar cultivadas por caña (CVC, 2012). El análisis aquí descrito se centra en una de esas parcelas, la parcela de Hacienda Real. Toda la información de la zona ha sido directamente proporcionada por la CVC.

#### 3.1 Características regionales

El área estudiada está situada al suroccidente de Colombia, entre las cordilleras Occidental y Central correspondiente a la zona plana del valle geográfico del río Cauca. El Valle del Cauca es una llanura aluvial situada en el sur del corredor entre Barranquilla (NE) y Cali (S). El clima típico de la zona es tropical con una temperatura media anual de 24°C y una precipitación de 1400 mm que suele ser muy intensa y de corta duración. La zona está afectada también por episodios de El Niño y La Niña. El último episodio de La Niña (2010-2012) se ha considerado como el más importante desde 1949 (Ortegón et al., 2016).

Las actividades agrícolas son el principal uso del suelo y el riego del área proviene del río Cauca a través de canales o pozos, aunque el principal recurso hídrico es el agua subterránea del Valle del Cauca, tanto para las zonas agrarias como para las zonas urbanas o industriales.

El depósito aluvial presenta materiales cuaternarios procedentes de la formación sedimentaria del río Cauca. Estos materiales pueden superar los 1000 m de profundidad y están compuestos por arenas y arcillas con acopios de gravas como resultado del depósito del río. La zona impermeable de la base está formada por material volcánico del período cretácico ya que el Valle del Cauca forma parte del cinturón de los Andes constituido por material volcánico y sedimentario mesozoico y cenozoico (Ortegón et al., 2016).

El acuífero tiene un espesor superior a los 600 m de profundidad y se caracteriza por ser multicapa con un nivel superior A, clasificado como acuífero de libre a semiconfinado, un nivel intermedio B, que forma una capa arcillosa bien diferenciada, y un nivel inferior C, acuífero profundo por debajo de los 180 m constituido por capas de gravas y arenas de carácter confinado. En la Figura 3.1 se puede ver el sistema del acuífero del río Cauca.

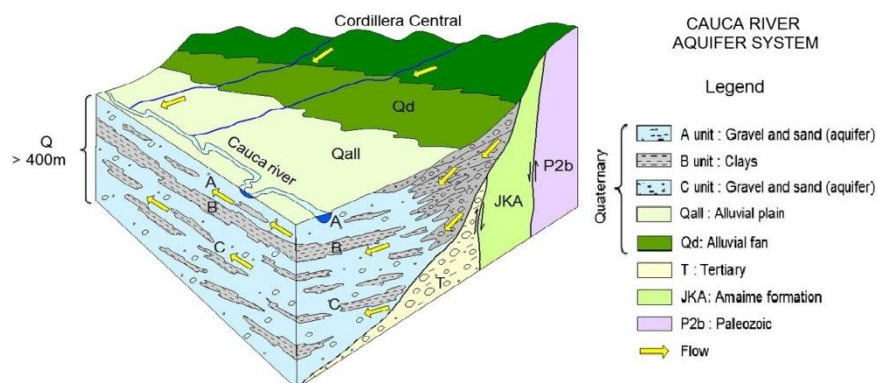


Figura 3. 1: Acuífero del río Cauca (Ortegón et al., 2016).

### 3.2 Parcela experimental

La parcela instrumentada para su estudio se denomina Hacienda Real. Este terreno de 4.7 ha está situado en el municipio de Palmira y pertenece al Ingenio Manuelita S.A. que explota el cultivo de la caña de azúcar. Su situación se muestra en la Figura 3.2.

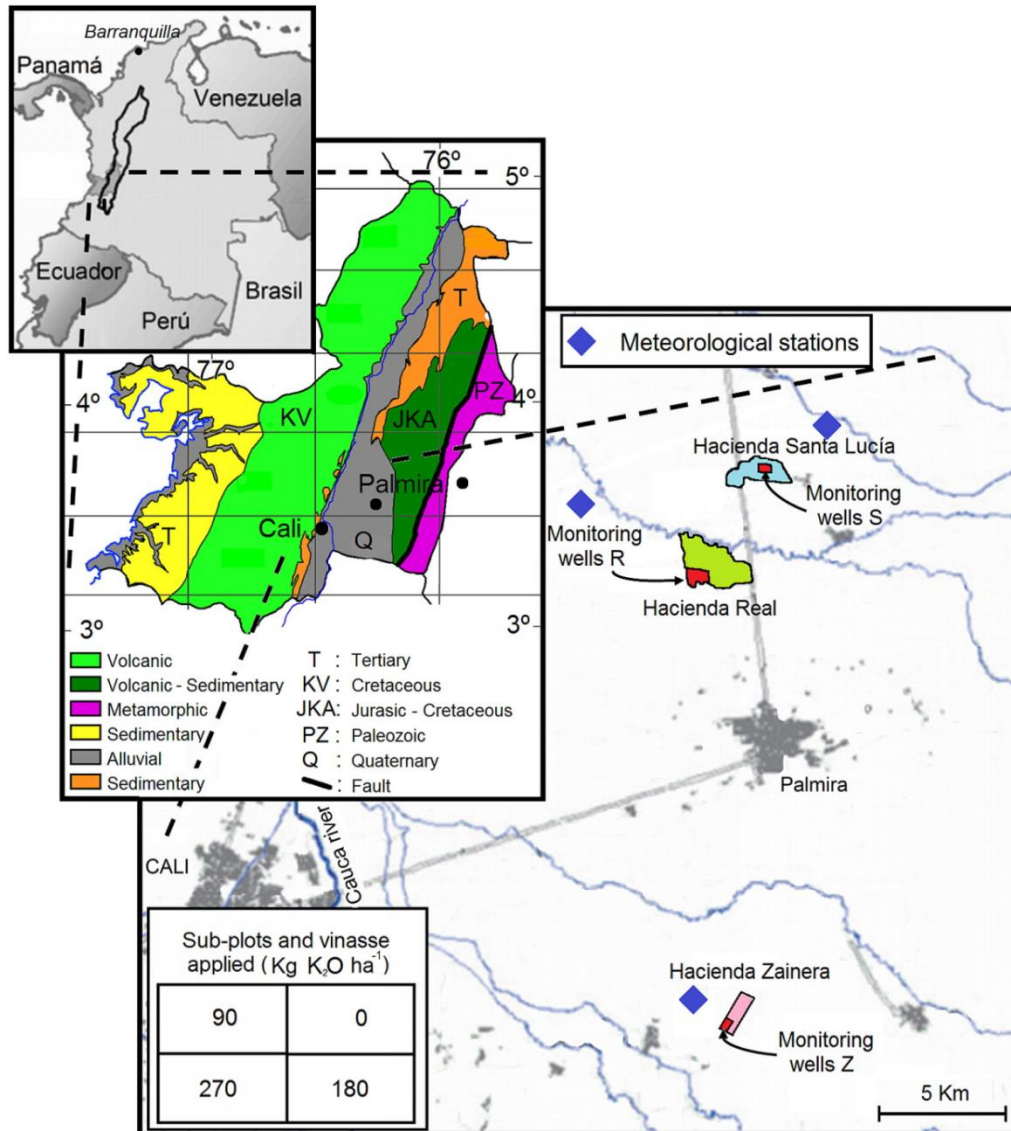


Figura 3. 2: Área de estudio, características geológicas y situación de las parcelas experimentales (Ortegón et al., 2016).

#### 3.2.1 Características de la zona no saturada: espesor y suelos

Para la caracterización de la parcela experimental se realizó la excavación de calicatas hasta 90 cm de profundidad, obteniendo muestras inalteradas del suelo que han proporcionado, posteriormente, las propiedades físicas e hidráulicas del suelo. Además, la instalación de varios pozos y piezómetros también ha permitido estudiar el espesor de la zona vadosa y analizar el flujo de agua que llega al acuífero. En la Figura 3.3 se puede observar la localización de los puntos de muestreo en Hacienda Real.

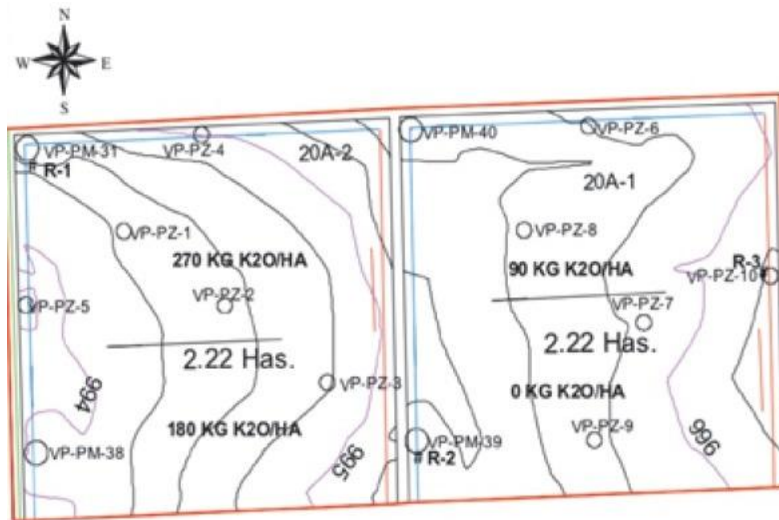


Figura 3. 3: Puntos de monitoreo Hacienda Real (CVC, 2012); VP-PM, son pozos de monitoreo, VP-PZ piezómetros y R permeámetros.

El espesor de la zona no saturada no es constante puesto que varía en función de la existencia de bombeo, recarga o descarga. En total el espesor de la zona no saturada en la parcela Hacienda Real está entre los 2 y 3.3 m de profundidad.

El esquema del perfil litológico de la zona se presenta en la Figura 3.4. Los suelos son de textura franco-arenosa hasta 1.60 m de profundidad, con niveles de limos y arenas interestratificados con limos arcilloso hasta 4.25 m de profundidad.

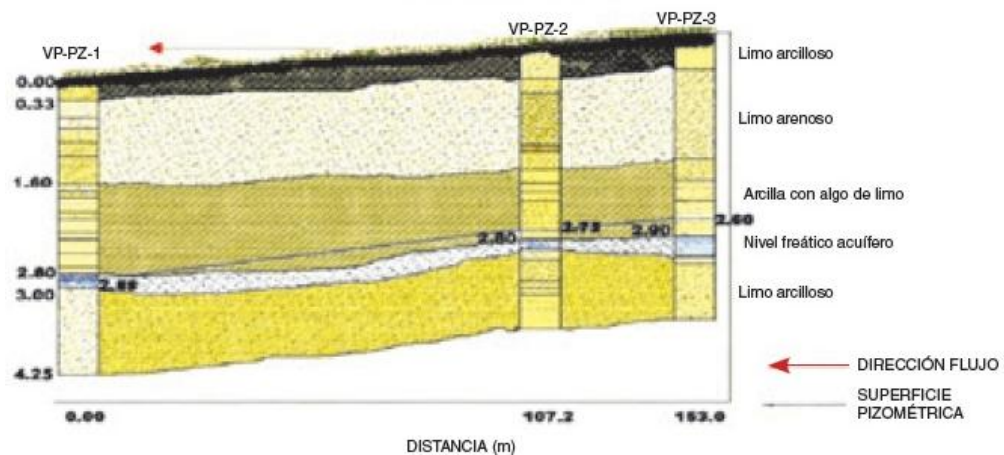


Figura 3. 4: Perfil litológico Hacienda Real (CVC, 2012).

En esta parcela se encuentran tres tipos de suelos, representados en la Figura 3.5:

- Manuelita (Mn7In): Suelo fluventic haplustolls, familia francosa fina, mezclada superactiva, isohipertérmica. Suelos profundos, bien drenados, de texturas moderadamente finas, reacción neutra a moderadamente alcalina y de fertilidad natural alta.
- Manuelita (Mn7Ia): Suelo fluventic haplustolls, familia francosa fina, mezclada superactiva, isohipertérmica. Suelos profundos, bien drenados, de texturas moderadamente finas, reaccion neutra moderadamente alcalina y de fertilidad natural alta.



- Río paila (RL7la): Fluventic Haplustolls, familia francosa gruesa, mezclada, superactiva, isohipertérmica. Son suelos profundos, bien drenados, de texturas medias planas y moderadamente gruesas, reacción neutra a moderadamente alcalina y de fertilidad natural alta.

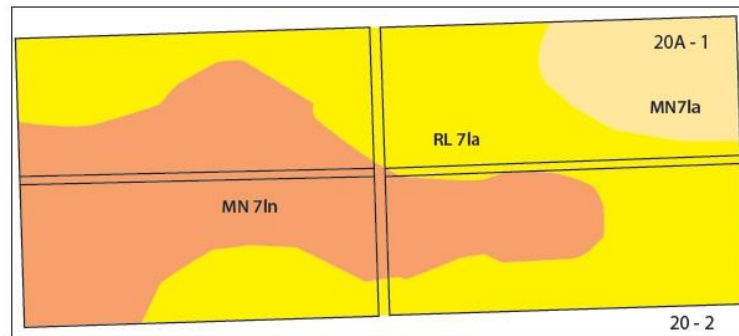


Figura 3. 5: Descripción suelos Hacienda Real (CVC, 2012).

### 3.2.2 Características físicas e hidráulicas

A partir de las muestras recogidas se obtuvieron las propiedades físicas del suelo en laboratorio: densidad aparente, porosidad, contenido de agua y curva de retención.

La densidad aparente se midió usando el método del anillo. En la parcela experimental se percibió su variabilidad en función de la profundidad. En los primeros 10 cm el valor de la densidad aparente es de  $1.30 \text{ g/cm}^3$ , a partir de los 10 cm y hasta los 90 cm varía entre  $1.54$  y  $1.58 \text{ g/cm}^3$ , considerándose como una densidad de alta limitación para permitir el desarrollo radicular.

En la determinación de la estructura del suelo se analizó el porcentaje de macroporos ( $> 100$  micras), mesoporos (30 - 100 micras, almacenan el agua aprovechable) y microporos ( $< 30$  micras, retienen el agua no aprovechable). En la parcela experimental la porosidad total entre 0 y 10 cm está por encima del 50%, disminuyendo en profundidad. Se puede observar la variación en la Figura 3.6.

Debe destacarse que la existencia de un bajo porcentaje de macroporos entre los 10 y los 20 cm dificulta el flujo del agua produciendo encharcamientos y limitando el flujo en las capas inferiores. El agua aprovechable está por debajo del 18% en todas las profundidades, en cambio el agua residual está por encima del 5% en todo el perfil siendo mayores en los primeros 30 cm.

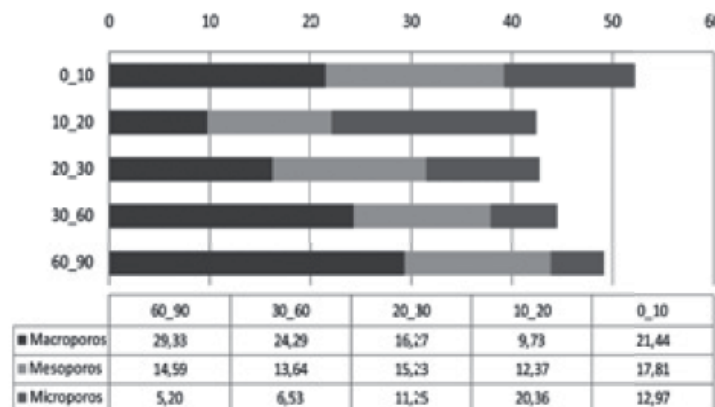


Figura 3. 6: Distribución del tamaño de poros (%) Hacienda Real (CVC, 2012).

Las curvas de retención de Hacienda Real se obtuvieron mediante ollas y platos de presión, cuyos resultados se recogen en la Figura 3.7. Se puede notar una correlación entre el contenido de humedad y la succión: a valores bajos de succión, el mayor contenido de humedad se muestra en los primeros 10 cm, debido a que el perfil presenta una capa limo-arcillosa; a mayor contenido de arena, menor contenido de humedad y mayor succión, que contribuye a la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación.

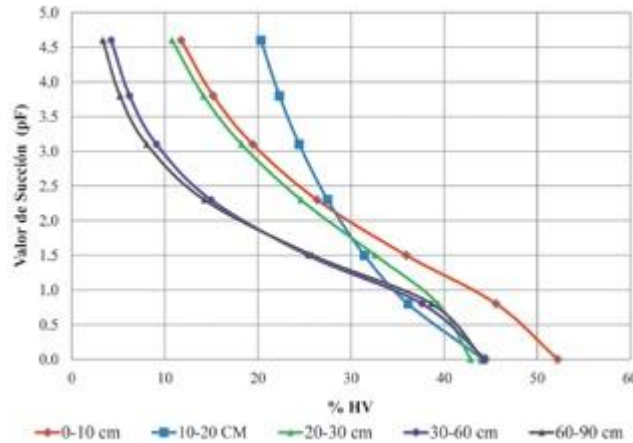


Figura 3. 7: Curva de retención Hacienda Real (CVC, 2012).

Las medidas in situ del potencial de succión se obtuvieron a partir del monitoreo de la zona vadosa mediante tensiómetros.

Otras características físicas analizadas para caracterizar el suelo de la parcela son: la resistencia tangencial al corte, la conductividad hidráulica saturada y la distribución de agregados.

La conductividad hidráulica saturada in situ se obtuvo con un permeámetro de Güelph a 30, 60 y 90 cm de profundidad con lecturas durante 30 minutos. En la parcela experimental los resultados obtenidos han sido: 0.54 cm/h a una profundidad de 30 cm, 1.33 cm/h a 60 cm y 0.20 cm/h a los 90 cm.

La conductividad hidráulica se obtuvo en el laboratorio a partir de anillos de 5 cm de altura mediante permeámetro de potencial constante. En la Figura 3.8 se muestran los resultados: 2.94 cm/h de 0 a 10 cm, 0.79 cm/h entre los 10 y los 20 cm, 2.38 cm/h de 20 a 30 cm, 11.01 cm/h entre 30 y 60 cm y 22.06 cm/h entre los 60 y 90 cm. La zona de 10 a 20 cm de profundidad presenta capas compactadas de alta densidad aparente que pueden ser resultado del paso de la maquinaria agrícola.

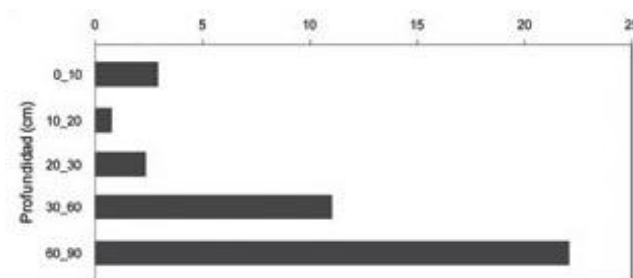


Figura 3. 8: Conductividad hidráulica en laboratorio Hacienda Real (CVC, 2012).



Para la distribución de los agregados en el perfil se realizó un tamizado de una muestra de suelo seco de cada profundidad y se calculó el diámetro medio ponderado (DMP). Además se realizó un análisis de estabilidad de los agregados para determinar su vulnerabilidad frente al agua.

### 3.3 Modelo conceptual de la zona no saturada

A partir de la caracterización del área de estudio (datos in situ y de laboratorio) se ha podido elaborar un modelo conceptual de la zona no saturada, Figura 3.9.

Los datos de entrada de agua a la zona no saturada son los procedentes de la precipitación y el riego con vinazas. La salida de agua de la zona no saturada se produce a través de la absorción de las raíces, la evapotranspiración y la recarga hacia el acuífero.

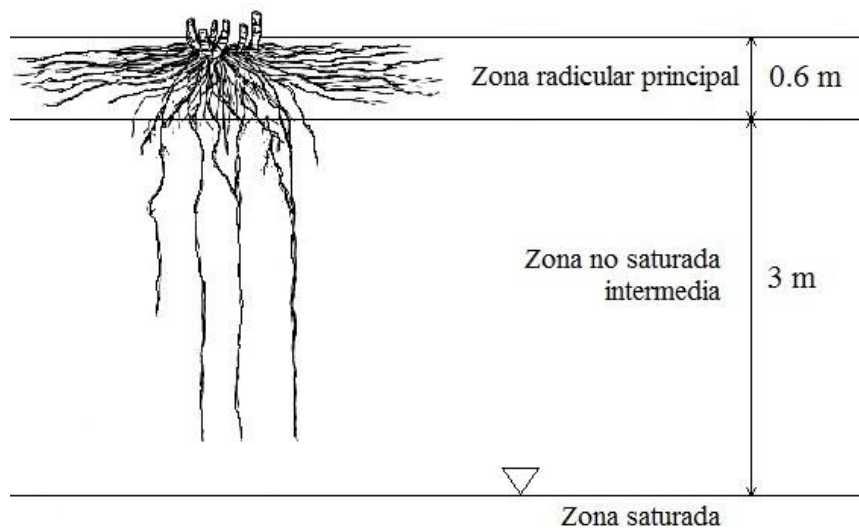


Figura 3. 9: Modelo conceptual ZNS de Hacienda Real.

## 4. METODOLOGÍA

En este apartado, se pretende definir la base metodológica sobre la que se ha creado el modelo de flujo de la zona no saturada. Se describen los métodos de instrumentación de la parcela estudiada, los datos registrados en campo y los obtenidos en laboratorio, la teoría numérica sobre la que se basa el modelo y la bondad de ajuste de éste.

### 4.1 Instrumentación del área experimental

Tal como se ha descrito anteriormente, la parcela ha sido monitoreada a partir de la instalación in situ de equipamiento destinado a seguir la evolución del flujo. Los equipos instalados son: tensiómetros, lisímetros o cápsulas de succión, pozos de monitoreo y piezómetros de la red de control de la CVC.

Para determinar el potencial del agua a cuatro profundidades y conocer la dirección del flujo no saturado se instalaron 4 tensiómetros a profundidades de 30, 60, 90 y 120 cm, respectivamente. La instalación de los tensiómetros de 30, 60 y 90 cm de profundidad tuvo lugar en 2006 pero no se inició la toma de datos hasta el 2008. Los registros se almacenaron en la base de datos y su disponibilidad se puede consultar en el Anejo A.

Los tensiómetros consisten en un tubo de PVC de 20 mm de diámetro con una cápsula porosa de cerámica en el extremo enterrado y un manómetro en el extremo de la superficie que mide la succión a la profundidad de la cápsula. En la Figura 4.1 se muestra en detalle el contacto entre un tensiómetro y el medio no saturado.

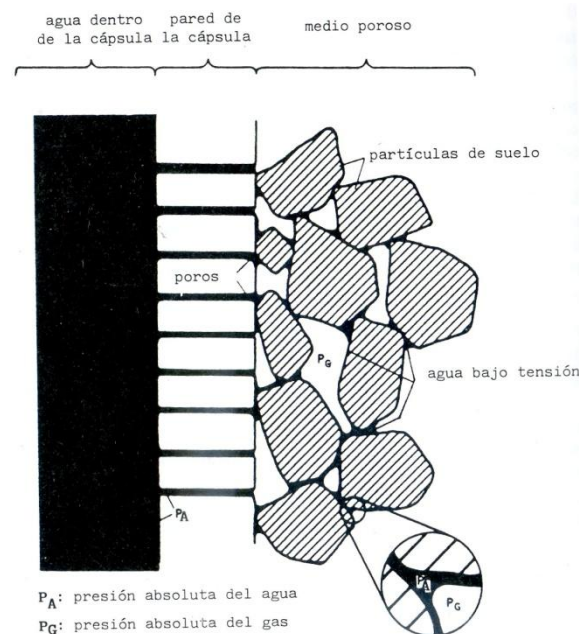


Figura 4. 1: Detalle de cápsula porosa entre el tensiómetro y el suelo (Candela et al., 1993).

Una limitación importante de estos aparatos es que pueden medir hasta un máximo de 0.8-0.9 bares (800-900 cm de columna de agua), ya que en succiones superiores el aire del suelo entra a través de las paredes del tensiómetro y cavita. Además, son sensibles a los cambios de temperatura, la presión atmosférica y a las bolsas de aire en el flujo del agua. Por ello, es

importante instalarlos en zonas con la menor deformación del suelo posible y realizar purgas de vaciado de aire ocluido para evitar lecturas erróneas. En la Figura 4.2 se muestra el tipo de tensiómetro usado en la parcela Hacienda Real.



Figura 4. 2: Tipo de tensiómetro en Hacienda Real (CVC, 2012).

Próximo a los tensiómetros se colocaron 4 cápsulas de succión para la toma de muestras de la ZNS a profundidades de 20, 30, 60 y 90 cm, respectivamente. Los lisímetros permiten extraer agua del suelo para analizarla y controlar su composición química, de este modo se determina la calidad del agua. En la Figura 4.3 se presenta el sistema y la colocación de tensiómetros y lisímetros.



Figura 4. 3: Colocación de lisímetros y tensiómetros Hacienda Real (CVC, 2012).

Se dispuso además de 4 pozos de monitoreo y 10 piezómetros para el estudio de la zona saturada en toda la extensión de Hacienda Real. Los valores obtenidos del nivel piezométrico en la parcela se encuentran entre un mínimo de 2.0 m y un máximo de 5.4 m, con un valor promedio de 3.2 m.

## 4.2 Obtención y análisis de los datos

Para poder cumplir con los objetivos del proyecto se requiere realizar un análisis de los datos disponibles y necesarios para poder crear un modelo numérico. Todos los datos han sido proporcionados por la CVC (Cali).

En el análisis de los datos se ha observado falta de información y datos repetidos o considerados erróneos. Se ha procedido a su filtrado y análisis de validez para poder generar un modelo más ajustado. El criterio seguido en el filtrado de registros ha sido discriminar aquellos datos de dudosa calidad y definir el período de tiempo más completo para depurar el mínimo de datos posibles. El período seleccionado para la calibración del modelo ha sido el comprendido entre el 20/6/2008 y el 4/5/2009.

En el presente subapartado se explicaran los datos extraídos de la parcela estudiada y los aspectos más relevantes de su obtención.

### 4.2.1 Datos meteorológicos

Los datos climáticos disponibles son los procedentes de las estaciones meteorológicas de Rozo (3.611313, -76.363550) y Aeropuerto (3.511844, -76.383230). Se dispone de un total de 490 registros, tomados diariamente en el período de estudio. Los datos diarios utilizados abarcan un período de 1/1/2008 a 4/5/2009. Nótese que se inicia antes la recogida de datos meteorológicos. Esto se debe a que las condiciones meteorológicas afectan a largo plazo a los procesos que se dan en el suelo y por eso es importante considerar los términos previos a la calibración. En la Figura 4.4 se expresa el intervalo de tiempo considerado. Véase, también, el Anejo A en el que se recoge la disponibilidad de los datos desde 2006 hasta 2016.

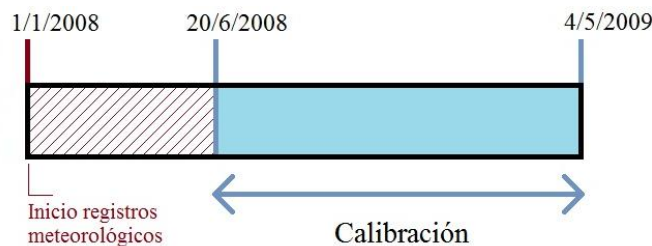


Figura 4. 4: Período de calibración del modelo.

Los datos meteorológicos son registros de precipitación [mm], temperatura máxima y mínima [°C], humedad relativa media del ambiente [%], radiación solar media [MJ/m<sup>2</sup>/día], velocidad media del viento [km/día] y luz solar [h].

En las Figuras 4.5 se puede ver la evolución de las temperaturas máximas y mínimas y de la precipitación diaria durante el período de tiempo seleccionado.

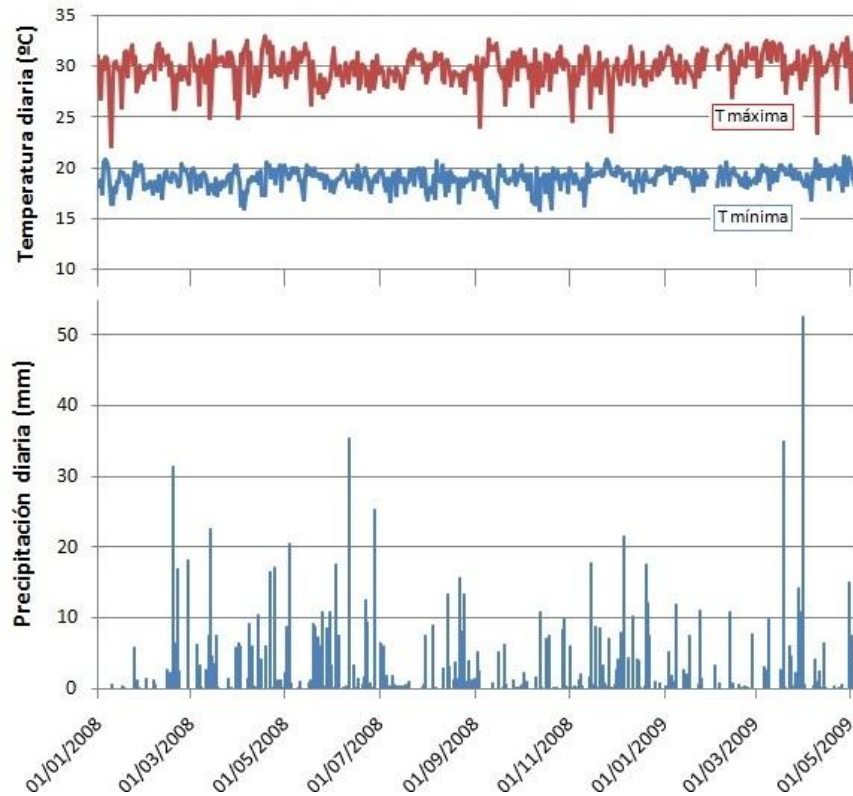


Figura 4. 5: Datos registrados de temperatura y de precipitación en el período de estudio.

#### 4.2.2 Riego con vinaza

Como ya se ha comentado anteriormente, en este documento solo se estudiarán los aspectos relacionados con el flujo. De todos modos, debe tenerse en cuenta que el objetivo del proyecto final de la simulación es estudiar el efecto de la aplicación de vinaza sobre el acuífero y sobre el suelo de la parcela estudiada. Por ello, se ha controlado la aplicación del fertilizante en el cultivo de la caña de azúcar, a partir de las dosis de vinaza y los días en que tuvo lugar su aplicación.

En la Tabla 4.1 se muestra la fecha y la dosis de riego de vinaza aplicada. Estos datos han sido proporcionados por Cenicaña, la empresa propietaria del ingenio azucarero.

Tabla 4. 1: Fechas del riego con vinaza y dosis de aplicación (Cenicaña, 2006-2011).

Año	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Número de Riegos	4	8	7	8	5	3
Riego (m3/ha)	30/03/2006	25/01/2007	26/01/2008	29/01/2009	07/01/2010	31/01/2011
	921.3	1105.6	731.3	882	1780.7	754
	06/04/2006	26/02/2007	02/02/2008	09/02/2009	13/02/2010	07/04/2011
	945	1131.7	637.7	862	1700.9	936.9
	26/05/2006	31/03/2007	29/03/2008	22/06/2009	27/07/2010	18/09/2011
	853.5	1133.8	824.7	659.8	766.1	1146.1
	18/12/2006	02/04/2007	21/05/2008	31/07/2009	25/08/2010	
	2016	987.1	92.13	1227.3	103.25	
		24/05/2007	28/07/2008	31/08/2009	05/10/2010	
		108.56	1125.6	1033.8	960.9	
		30/06/2007	30/10/2008	15/09/2009		
		972.8	954	852.3		
		31/07/2007	17/11/2008	16/10/2009		
		1047.3	928.6	108.39		
		01/08/2007		20/11/2009		
		1080		1655.4		
Volumen aplicado (m3/ha)	4735.8	7566.86	5294.03	7280.99	5311.85	2837
Vinaza aplicada (90) (m3/ha)			2,360	2,360	2,360	2,360
Vinaza aplicada (180) (m3/ha)			4,674	4,674	4,674	4,674
Vinaza aplicada (270) (m3/ha)			6,890	6,890	6,890	6,890

Para el calibrado del modelo de flujo, se ha considerado el riego con vinaza como aplicación de agua sobre la parcela, sumando el valor correspondiente de los días de aplicación de fertilizante a los datos de precipitación registrados en las estaciones meteorológicas. De este modo el input total de agua se introduce en el modelo como condición de contorno.



#### 4.2.3 Cultivo de caña de azúcar

La completa simulación del flujo necesita de una total caracterización del crecimiento de la caña de azúcar existente en la zona a modelar. Se debe destacar que la caracterización del crecimiento de la caña de azúcar y el efecto de la planta sobre el agua del suelo es muy compleja de modelar y ha presentado numerosos inconvenientes debido a la gestión y manejo de la caña de azúcar en campo.

Las partes de la caña que influyen en el flujo del agua hacia el acuífero son principalmente las raíces, aunque también afectarían en menor grado el tallo y las hojas.

El sistema radical constituye el anclaje de la planta y el medio de absorción de nutrientes y agua del suelo. Dado que la planta de caña nace de otro trozo de caña, el sistema radical está formado por dos tipos de raíces: las raíces primordiales, y las raíces permanentes. Las raíces primordiales provienen de la estaca original que se siembra. Son raíces delgadas y muy ramificadas, con un período de vida de 2 a 3 meses. Las raíces permanentes surgen de los nuevos brotes. Suelen ser numerosas, gruesas, de rápido crecimiento y cuya proliferación avanza con el desarrollo de la planta (Amaya et al. 1995). La Figura 4.6 muestra el sistema radical de la caña joven.

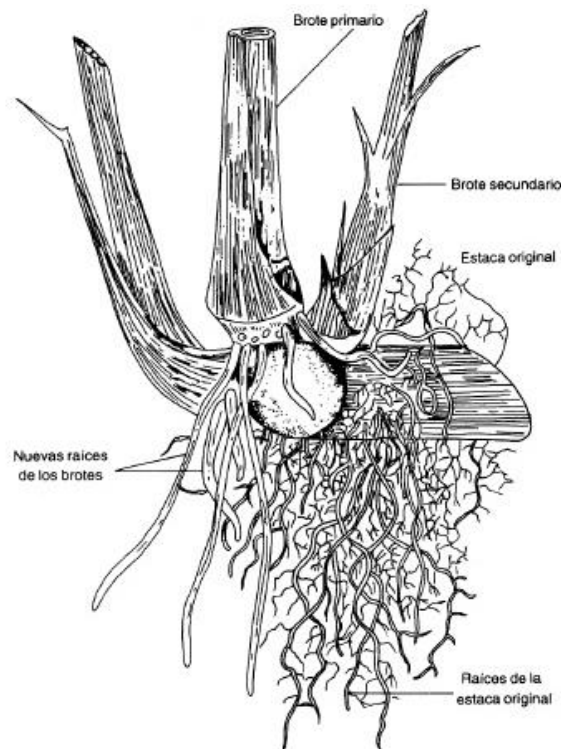


Figura 4. 6: Sistema radical de la caña de azúcar (Amaya et al.,1995).

La distribución de las raíces es importante para la absorción del agua y los nutrientes. Se distinguen tres tipos de raíces: las absorbentes o superficiales; las de anclaje o sostén; y las profundas. Las raíces superficiales predominan en los primeros 60 cm de profundidad y se extienden horizontalmente llegando a alcanzar 2 m. Las raíces de sostén se extienden verticalmente y también se encuentran en los primeros centímetros del suelo. Es difícil distinguir las raíces de sostén de las raíces superficiales puesto que el 85% de las raíces de la caña de azúcar se encuentra en los primeros 60 cm de profundidad. Las raíces profundas, en cambio, son muy escasas pero pueden alcanzar los 4 m de profundidad (Amaya et al. 1995). La Figura 4.7 muestra los diferentes tipos de raíces en función de su distribución.

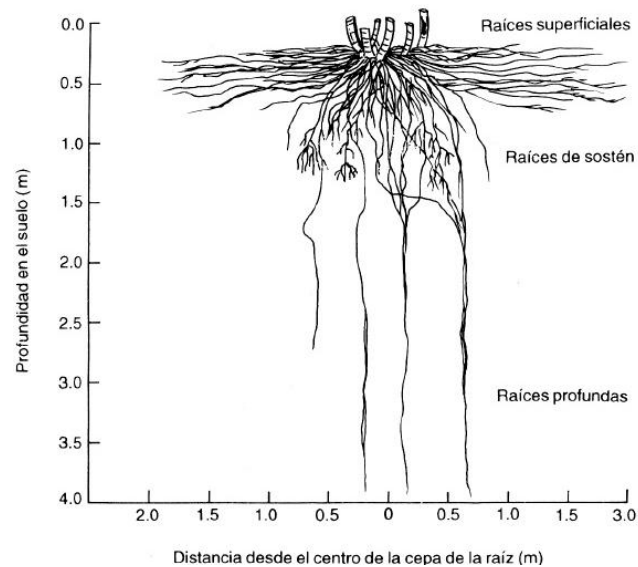


Figura 4. 7: Distribución radical de la caña de azúcar (Amaya et al., 1995).

Desde un punto de vista productivo, el tallo es la parte más importante de la planta. En él se almacena el azúcar. Cuando los tallos de la plantilla ya están maduros, se cortan desde la base para ser cosechados y sus raíces mueren. En la cepa rebrotan los tallos y se da origen a la soca volviendo a crecer la planta. El número de cortes del cultivo (plantilla y socas) determina la producción de la caña de azúcar que, en general, tiende a reducirse a medida que avanza el número de cortes (Amaya et al., 1995).

A menudo se utiliza el número de tallos y la tasa elongación de éstos para estimar el crecimiento de la planta. La Figura 4.8 presenta el desarrollo de la caña de azúcar en función de su edad.

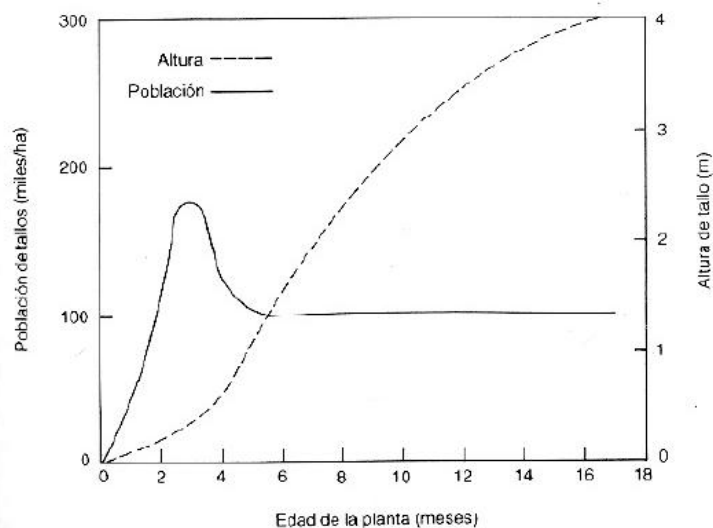


Figura 4. 8: Variación de la población y la altura de la planta de caña en función de su edad (Amaya et al., 1995).

Las hojas de la caña de azúcar se distribuyen en posiciones alternas a lo largo del tallo a medida que éste crece. El índice de área foliar (LAI) es un parámetro fundamental para determinar la productividad y se define como el área foliar por unidad de superficie del suelo. La intercepción de la energía solar es una función logarítmica del LAI. En el cultivo de la caña se requiere un

LAI entre 4 y 6 para interceptar el 90% de la radiación solar; en este rango se maximiza la tasa de crecimiento, sin mantener un exceso de follaje. En Colombia, las mediciones preliminares indican valores de LAI que varían entre 4 y 7, en cultivos de 8 a 9 meses de edad (Amaya et al., 1995).

Las condiciones ambientales también afectan al desarrollo de la planta. La temperatura es un factor determinante por lo que el rango óptimo de temperaturas para el crecimiento de la planta se encuentra entre 26 y 30°C. Aunque el factor más influyente es la disponibilidad de agua, pues su déficit o exceso puede tener efectos negativos en el desarrollo del cultivo. En el Valle del Cauca, el nivel freático se encuentra a una profundidad considerable que causa una disminución significativa en la producción de biomasa, pero, a veces, esta condición aumenta el contenido de sacarosa, debido a que la planta sufre cierto grado de estrés (Amaya et al., 1995).

En la Tabla 4.2 se muestran los datos del ciclo del cultivo en la parcela de estudio.

Tabla 4. 2: Datos del ciclo de la caña de azúcar en la parcela experimental proporcionados por Cenicaña.

Ciclo	Fecha	Edad
Primer ciclo (plantilla)	22/1/2008 al 4/5/2009	15.6 meses
Segundo ciclo (soca 1)	5/5/2009 al 11/6/2010	13.4 meses
Tercer ciclo (soca 2)	12/6/2010 al 27/07/2011	13.7 meses
Último ciclo	31/7/2012	-
Primer riego de renovación	20/11/2012	-

#### 4.2.4 Zona no saturada

El control del flujo a través de la ZNS lo ha realizado CVC a partir del monitoreo de la succión mediante tensiómetros situados en la parcela Hacienda Real. La lectura se obtuvo de forma diaria en Cenicaña por un trabajador de la empresa y los datos se proporcionaron a la CVC. Posteriormente, se observó que estas lecturas presentaban bastantes errores.

##### 4.2.4.1 Medidas de campo: succión

Desde junio de 2008 se ha estado monitorizando la succión matricial (cm) en 3 tensiómetros y tres profundidades distintas (30, 60 y 90 cm). De estos registros el de 90 cm se interrumpió en agosto de 2009 y no se reanudó hasta marzo de 2015. Cabe decir que en el 2014 se volvió a reiniciar la lectura y los registros. En julio de 2014 se instaló en la parcela una nueva sonda para obtener registros del contenido de humedad del suelo a profundidades de 30, 60 y 90 cm y en diciembre de 2014 se añadió un nuevo tensiómetro a una profundidad de 120 cm. La información sobre la disponibilidad de los datos se puede consultar en el Anejo A.

El período más completo de datos disponibles de succión ha sido el comprendido entre el 20/6/2008 y el 4/5/2009. Por eso, se estableció como el período de calibración y, además, coincide con el primer ciclo del cultivo de la caña.

Se debe destacar que en las lecturas registradas de la succión matricial se observan datos repetidos y la presencia de mesetas, datos anómalos debidos probablemente a la saturación (se produjo un importante fenómeno de La Niña que inundó los cultivos) o a cavitación. En la Figura 4.9 se muestran los datos recogidos de campo de la succión matricial.



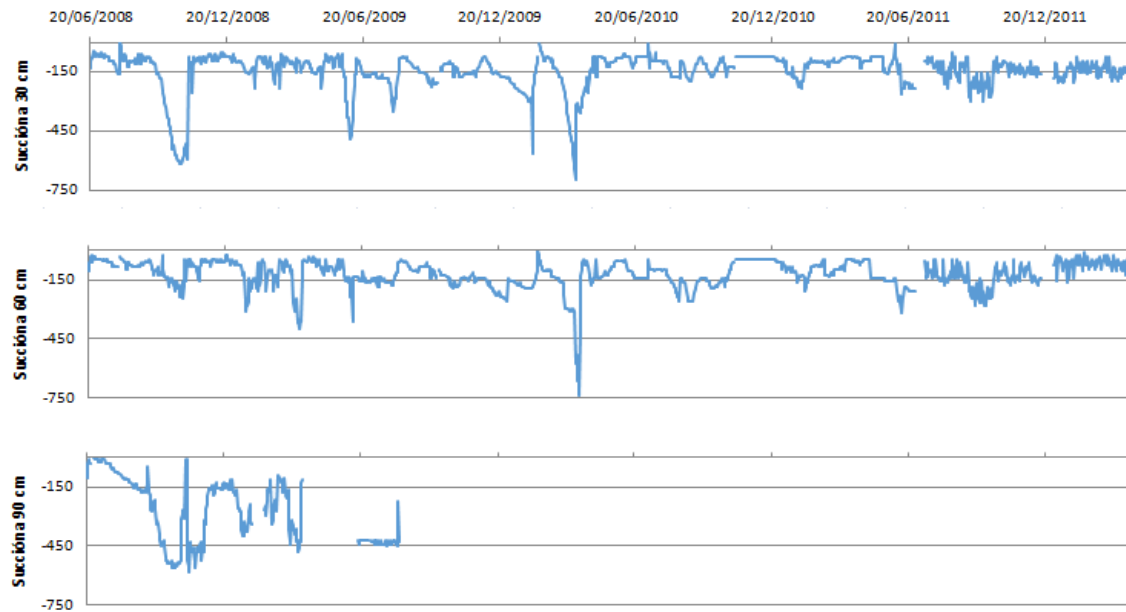


Figura 4. 9: Succión (en cm) observada en los tensiómetros a 30, 60 y 90 cm de profundidad.

#### 4.2.4.2 Parámetros hidráulicos

Las propiedades hidráulicas iniciales de la ZNS en la parcela de Hacienda Real fueron proporcionados por CVC (2012). Estos datos se obtuvieron a partir de las curvas de retención (determinadas mediante un estudio físico del suelo hasta la profundidad de 90 cm) y el software RETENTION CURVE (RETC), versión 6.02. A partir de las curvas de retención, el código se basa en métodos numéricos para calcular los parámetros de van Genuchten referentes a una curva de retención teórica y la aproxima a la experimental (CVC, 2012). En la Tabla 4.3 se muestran los parámetros obtenidos por CVC a partir del programa RETC.

Tabla 4. 3: Parámetros de van Genuchten obtenidos por CVC (CVC, 2012).

Profundidad (cm)	Teta residual. (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Teta saturación (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\alpha$	n	m	Ksat (cm/día)
0-10	0.00030	0.5222	0.32845	1.16088	0.13858	70.56
10-20	0.17762	0.4246	0.04700	1.35054	0.25956	18.96
20-30	0.06902	0.4276	0.10353	1.29484	0.22770	57.12
30-60	0.06433	0.4446	0.05223	1.72331	0.41972	264.24
60-90	0.03976	0.4412	0.07251	1.52665	0.34497	529.44

Posteriormente, se ensayaron muestras representativas del suelo obtenidas en 2015 en los laboratorios de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Se obtuvieron nuevas curvas de succión y parámetros, además de información de textura, granulometrías, densidad aparente, conductividad hidráulica saturada, porosidad total y composición mineralógica (Candela et al., 2016). Los parámetros introducidos en el modelo (Tabla 5.1) se han basado en los resultados obtenidos en laboratorio (Tabla 4.4).

Tabla 4. 4: Parámetros de van Genuchten obtenidos en el laboratorio de la UPC en 2015 (Candela et al., 2016).

Profundidad [cm]	$\theta_r$ [-]	$\theta_s$ [-]	$\alpha$ [cm <sup>-1</sup> ]	n [-]	K <sub>s</sub> [cm/día]	l [-]
30	0.12644	0.31928	0.062833	1.5345	5.59451155	0.5
60	0.017478	0.25174	1.0085	1.1983	146.959216	0.5
90	0.030031	0.23348	0.20499	1.6024	947.051872	0.5
120	0.033735	0.32338	0.019269	2.1782	173.031487	0.5

### 4.3 Base teórica del modelo numérico

Como se ha presentado, la zona no saturada es una parte fundamental en el ciclo hidrológico en los aspectos relativos a infiltración, evaporación, toma de agua por las raíces de la planta y recarga de agua subterránea.

Actualmente, existe una gran variedad de modelos más o menos simples para la simulación del flujo del agua y transporte de solutos hacia el nivel freático. Lamentablemente, en el caso de procesos complicados, como los que tienen lugar en la ZNS, las soluciones analíticas que proponen autores como van Genuchten no son adecuadas y se deben usar modelos numéricos complejos. Por ello, para elaborar el modelo de flujo en la zona no saturada de la parcela experimental de Hacienda Real se ha usado el código HYDRUS-1D (Šimůnek et al., 2013).

HYDRUS-1D, versión 4.16, es un modelo numérico que simula el flujo de agua, calor y solutos a través de medios porosos con condiciones de saturación variables. El programa resuelve mediante el método de diferencias finitas la ecuación de Richards modificada en el flujo de agua en medio saturado y no saturado.

El proceso de modelación de la parcela ha consistido en dos fases:

- En la primera fase se ha elaborado el modelo a partir de los datos de succión obtenidos en la zona de estudio para obtener una simulación inicial.
- En la segunda fase se ha realizado una calibración de modelo manual y automáticamente para ajustar la simulación y analizar los parámetros hidráulicos. El período calibrado es el comprendido entre 20/6/2008 y 4/5/2009.

La base de datos usada para la elaboración del modelo y el período de tiempo para la elaboración del modelo es el definido en los apartados anteriores (Figura 4.4).

En este apartado se exponen los aspectos teóricos de HYDRUS-1D para simular el flujo. Debe considerarse que solamente se presentan las opciones seleccionadas para modelar el flujo de agua del caso de estudio.

#### 4.3.1 Ecuación del flujo en medio no saturado

El flujo de agua unidimensional en un medio poroso no deformable y parcialmente saturado se describe con la ecuación de Richards modificada (4.1) (Šimůnek et al., 2013). Esta formulación supone que la presión del aire permanece constante sin afectar al flujo de la fase líquida y, además, no considera el efecto de los gradientes térmicos, eléctricos y de salinidad en el movimiento del agua (Candela et al., 1993).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S \quad (4.1)$$

Donde,  $h$ , es la presión matricial del agua [L];  $\theta$ , es el contenido de agua volumétrico [ $L^3 L^{-3}$ ];  $t$ , es el tiempo [T];  $x$ , es la coordenada espacial vertical [L];  $S$ , es el término fuente-sumidero [ $L^3 L^{-3} T^{-1}$ ], que en el caso de suelos cultivados representa la cuantía de la extracción de agua por las raíces de las plantas;  $\alpha$ , es el ángulo entre la dirección del flujo y la vertical ( $\alpha = 0^\circ$  para flujo vertical);  $K$ , es la función conductividad hidráulica no saturada [ $LT^{-1}$ ] (4.2) definida como:

$$K(h, x) = K_s(x)K_r(h, x) \quad (4.2)$$

Donde  $K_r$  es la conductividad hidráulica relativa [-] y  $K_s$  la conductividad hidráulica saturada [ $LT^{-1}$ ].

#### 4.3.2 Captación de agua por las raíces

El término sumidero,  $S$ , se define como el volumen de agua extraído por unidad de volumen de suelo debido a la absorción de las plantas. Feddes et al. (1978) define  $S$  (4.3) como:

$$S(h) = \alpha(h)S_p \quad (4.3)$$

Donde,  $\alpha(h)$ , es la función adimensional del potencial matricial y da respuesta al estrés hídrico ( $0 \leq \alpha \leq 1$ );  $S_p$ , es la adsorción potencial [ $T^{-1}$ ] (Šimůnek et al., 2013).

En la Figura 4.10 se muestra el esquema de la función  $\alpha(h)$  propuesto por Feddes et al. (1978).

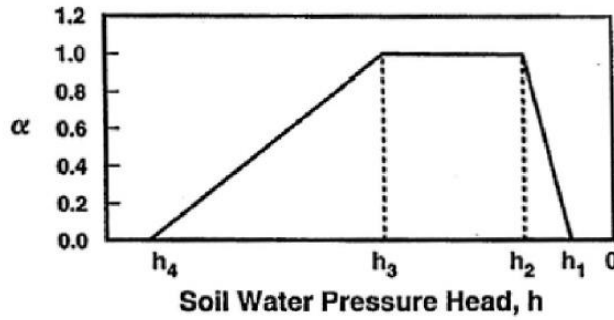


Figura 4. 10: Esquema de la función respuesta al estrés hídrico,  $\alpha(h)$ , propuesto por Feddes et al. (1978) (Šimůnek et al., 2013).

#### 4.3.3 Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos del medio no saturado,  $\theta(h)$  y  $K(h)$  que aparecen en la ecuación 4.1 son, en general, funciones no lineales de la succión matricial. HYDRUS-1D permite escoger entre cinco modelos analíticos diferentes, de los que se ha seleccionado el modelo de *van Genuchten* (1980).

El modelo de *van Genuchten* (1980) usa el modelo estadístico del tamaño de poros de *Mualem* (1976) para obtener la función de la conductividad hidráulica no saturada en términos de los parámetros de retención del agua en el suelo.

Las ecuaciones de *van Genuchten* son las expresadas en 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7.

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4.5)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (4.6)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n > 1 \quad (4.7)$$

Donde,  $S_e$ , es la saturación efectiva [-];  $\theta_r$  y  $\theta_s$ , son el contenido de agua residual y saturado, respectivamente [ $L^3 L^{-3}$ ];  $\alpha$ , es el valor de la entrada de aire [ $L^{-1}$ ];  $n$ , es la distribución del tamaño de poros [-];  $l$ , es el parámetro de conectividad entre los poros [-], supuesto como 0.5 en la mayoría de los suelos (Šimůnek et al., 2013).

#### 4.3.4 Condiciones iniciales

La solución para la ecuación 4.1 requiere saber la distribución inicial de la presión matricial o el contenido de agua en el dominio del flujo:

$$\begin{aligned} h(x, t) &= h_i(t) & t &= t_0 \\ \theta(x, t) &= \theta_i(t) & t &= t_0 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Donde,  $h_i$  [L] y  $\theta_i$  [ $L^3 L^{-3}$ ] son funciones espaciales prescritas; y  $t_0$  es el tiempo inicial de la simulación.

#### 4.3.5 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno que involucran la interfase suelo-aire son las referentes a las condiciones atmosféricas. El flujo potencial que atraviesa la interfase se controla únicamente por condiciones externas. Sin embargo, el flujo real depende también de las condiciones de humedad predominantes (transitorias) cerca de las superficie.

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial se ha optado por la ecuación Penman-Monteith combinada que propone HYDRUS-1D. La aproximación de Penman-Monteith define la evapotranspiración de referencia,  $ET_0$ , combinando los términos de radiación y aerodinámicos como se expresa en 4.9.

$$ET_0 = ET_{rad} + ET_{aero} = \frac{1}{\lambda} \left[ \frac{\Delta(R_n - G) + \rho c_p (e_a - e_d)/r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \right] \quad (4.9)$$

Donde,  $ET_{rad}$ , es el término de radiación [ $mm d^{-1}$ ];  $ET_{aero}$ , es el término aerodinámico [ $mm d^{-1}$ ];  $\lambda$ , es el calor latente de vaporización, que suele considerarse constante y de valor  $2,45 MJ kg^{-1}$ ;  $R_n$ , es la radiación neta [ $MJ m^{-2} d^{-1}$ ];  $G$ , es el flujo de calor en el suelo [ $MJ m^{-2} d^{-1}$ ];  $\rho$ , es la densidad media del aire a presión constante [ $kg m^{-3}$ ];  $c_p$ , es el calor específico del aire, es decir,  $1.013 kJ kg^{-1} ^\circ C^{-1}$ ;  $(e_a - e_d)$ , expresa el déficit de presión de vapor [kPa], donde  $e_a$ , es la presión de vapor de saturación a temperatura  $T$  [kPa] y  $e_d$ , es la presión de vapor actual [kPa];  $r_c$  y  $r_a$ , son las resistencias superficial y aerodinámica, respectivamente [ $s m^{-1}$ ]. La pendiente de la curva de la presión de vapor,  $\Delta$  [ $kPa ^\circ C^{-1}$ ] y la constante psicrométrica,  $\gamma$  [ $kPa ^\circ C^{-1}$ ], se definen como las expresiones 4.10 y 4.11, respectivamente (Šimůnek et al., 2013).

$$\Delta = \frac{4098 e_a}{(T + 237.3)^2} \quad (4.10)$$

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} \cdot 10^{-3} = 0.00163 \frac{P}{\lambda} \quad (4.11)$$

Donde,  $T$ , es la temperatura media del aire [°C];  $P$ , es la presión atmosférica [kPa];  $\varepsilon$ , es el ratio entre el peso molecular del vapor de agua y el aire seco, generalmente, de valor constante 0.622.

Respecto a las condiciones de contorno en el fondo, se ha considerado que el drenaje es libre dado que en la parcela experimental se ha detectado la presencia del nivel freático a mucha profundidad.

#### 4.3.6 Método numérico

HYDRUS-1D usa el método de diferencias finitas para proceder a la discretización de la ecuación de Richards, presentada en la expresión 4.1.

#### 4.4 Bondad de ajuste

Para analizar la calidad de la simulación y la bondad de ajuste del modelo se ha realizado una inspección visual comparando los datos simulados respecto los datos registrados, además de usar métodos estadísticos.

El programa HYDRUS-1D proporciona directamente el coeficiente de determinación,  $R^2$ , pero cuando se trabaja con series temporales de datos no resulta ser un buen indicador (Legates et al., 1999). Por esto, se ha considerado usar una combinación de estadísticos y proporcionar una visión más amplia del error y el ajuste del modelo. Los métodos estadísticos que se han usado son: el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE) y el coeficiente de eficiencia del modelo Nash-Sutcliffe (EF), expresados en 4.12, 4.13 y 4.14, respectivamente.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n (P_i - M_i)^2 \right)} \quad (4.12)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - M_m)^2} \quad (4.13)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - M_i| \quad (4.14)$$

Donde,  $n$ , es el número total de valores a evaluar;  $P_i$ , es el valor simulado  $i$ ;  $M_i$ , es el valor observado  $i$ ; y  $M_m$ , es el valor medio de los valores observados.

El error relativo entre los valores simulados y los registrados viene determinado por RMSE, el cual, cuan menor y más cercano a 0 mejor. La magnitud del error viene establecida por EF y MAE. Cuando EF vale 1 representa el ajuste perfecto, si vale 0 el ajuste con valor promedio es mejor. El valor de MAE debe ser el mínimo posible.

## 5. MODELACIÓN

Una vez analizados los datos disponibles en la parcela de Hacienda Real y desarrollado el modelo conceptual y la geometría del perfil, se procede a elaborar el modelo de flujo en el código de HYDRUS. En este apartado se detallan los pasos seguidos para su generación y calibración. En el Anejo B se describen puntos específicos que no se han explicitado en este apartado con el fin de simplificar el proceso seguido.

### 5.1 Elaboración del modelo conceptual y numérico

El modelo conceptual definido de 100 cm de espesor consta de 3 capas de 20, 50 y 30 cm, respectivamente, definidas según los datos analizados en campo y laboratorio. El nivel freático se situó siempre por debajo de los 2 m de la superficie del terreno (Figura 3.9). Las condiciones de contorno iniciales definidas en la superficie del suelo han sido las dadas por la precipitación, el riego aplicado y la evapotranspiración potencial, además de considerarse flujo libre como condición de fondo. Previamente, se ha determinado el intervalo de datos más completo como el comprendido entre el 1/1/2008 y el 4/5/2009 que corresponde a 490 días.

El primer paso para elaborar el modelo de simulación del flujo de agua en zona no saturada es definir los procesos principales (*Main Processes*, en HYDRUS-1D) que se deben considerar.

El objetivo principal es simular el flujo de agua y calibrar los parámetros para que el modelo se ajuste lo máximo posible a los datos recogidos en la parcela experimental. La calibración del modelo se realiza mediante el modelo inverso (*Inverse Solution*).

Además, se debe considerar la absorción del agua a través de las raíces ya que el desarrollo y el ciclo de la planta es fundamental para el estudio del flujo del agua.

Cuando se usan datos meteorológicos para calcular la evapotranspiración potencial y se usa la función de crecimiento de raíces (función logística Verhulst-Pearl) para calcular su profundidad, se debe seleccionar la opción *Root Growth*. Los parámetros de la función de Verhulst-Pearl se especifican en los apartados siguientes.

En la Figura 5.1 se muestra la primera ventana de HYDRUS-1D con las opciones seleccionadas.

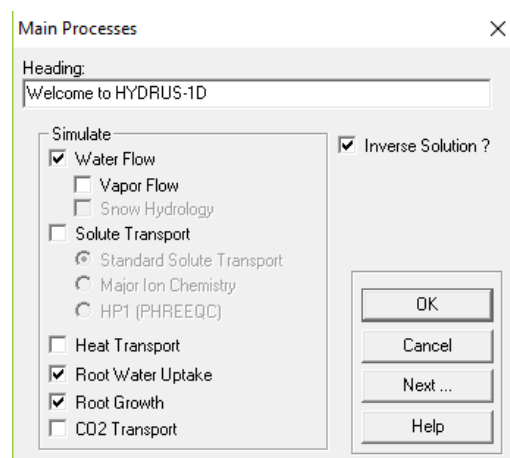


Figura 5. 1: Ventana *Main Processes* de HYDRUS-1D.

### 5.1.1 Geometría

A partir de los datos disponibles se ha definido la geometría del modelo. La Figura 5.2 muestra la ventana *Geometry Information* de HYDRUS-1D en la que se definen los aspectos básicos que determinan la geometría del modelo a simular.

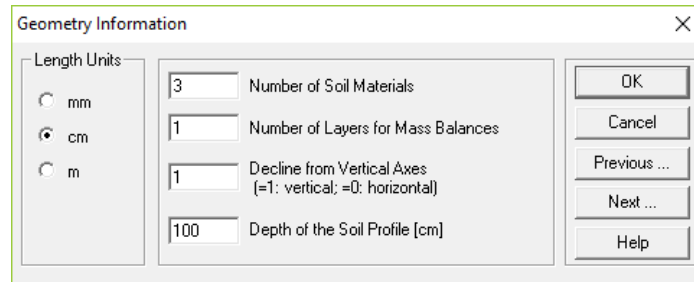


Figura 5. 2: Ventana *Geometry Information* de HYDRUS-1D.

Respecto a la geometría del modelo, el número de capas de material es el número de capas a discretizar que presentan propiedades hidráulicas diferentes y se resuelven con distintas ecuaciones de flujo; se ha considerado que el balance de masa se realiza en una única capa para todo el dominio del modelo; el flujo del agua se ha definido como vertical, por lo que la inclinación (especificada en términos de  $\cos \alpha$  de la expresión 4.1) respecto la vertical tiene valor 1; y se establece la simulación del modelo numérico en los primeros 100 cm del suelo.

El entorno gráfico de HYDRUS-1D se muestra en la Figura 5.3 en el que se detallan aspectos de la geometría del modelo. El material 1 (de 0 a 19 cm) no incluye la zona radicular principal pero su contenido de materia orgánica es muy elevada ya que es donde se producen las actividades agrícolas. El material 2 (de 20 a 69 cm) y el material 3 (de 70 a 100 cm) corresponden a un suelo de arena fina, de baja cantidad de materia orgánica y presencia de limos que aumenta en profundidad.

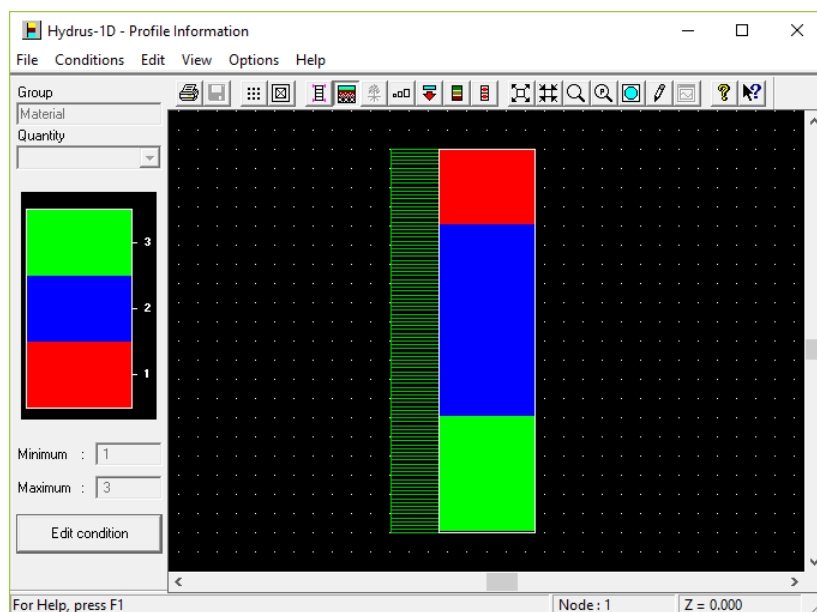


Figura 5. 3: Definición de las capas de diferentes materiales en la ventana *Profile Information* de HYDRUS-1D.

El entorno gráfico también permite definir puntos de observación asignados a los nudos y se usan para introducir los datos extraídos de campo en el proceso del calibrado. De este modo, se han definido 3 puntos coincidentes con los puntos de toma de datos de los tensiómetros. En la Figura 5.4 se muestran los puntos de observación en las profundidades de 30, 60 y 90 cm, respectivamente.

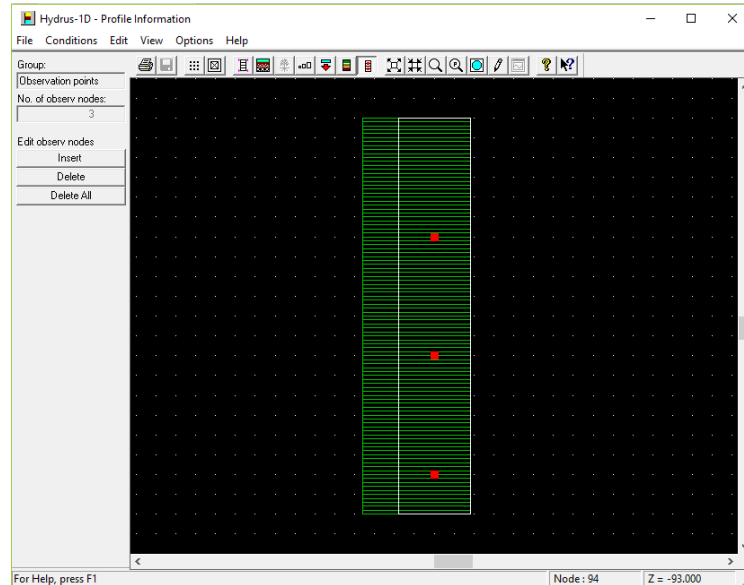


Figura 5. 4: Definición de los puntos de observación en la ventana Profile Information.

### 5.1.2 Discretización espacial

El programa de análisis genera una malla de elementos finitos de manera automática en el perfil definido. La malla definida uniforme de 101 nudos y 100 elementos.

### 5.1.3 Discretización temporal

En este punto se debe definir el período de tiempo en el que se va a calibrar el modelo. En la Figura 5.5 se pueden observar los valores establecidos para los tiempos de paso máximos y mínimos así como el número de datos temporales a introducir para las condiciones de contorno que coincide con los 490 días de simulación. También debe determinarse el método de cálculo de la evapotranspiración de referencia, es decir, es el método de Penman-Monteith.

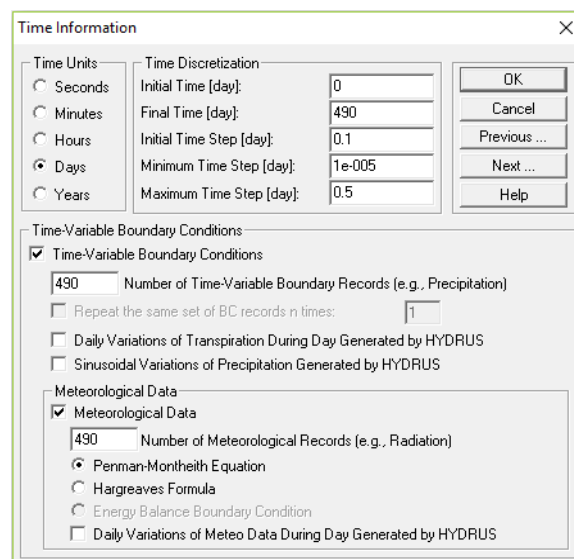


Figura 5. 5: Ventana Time Information de HYDRUS-1D.



#### 5.1.4 Criterios de iteración

Para facilitar la ejecución del programa, el manual de HYDRUS-1D (Šimůnek et al., 2013) recomienda no modificar los valores de iteración que aparecen por defecto. De todos modos, para una mejor calibración automática se ha modificado el valor de iteraciones máximas a 20.

#### 5.1.5 Propiedades hidráulicas del suelo: modelo y parámetros

Como se ha descrito anteriormente, el modelo analítico escogido para simular el flujo de agua en zona no saturada es el de van Genuchten-Mualem, un modelo de porosidad simple en el que no se considera la histéresis (Figura 5.6).

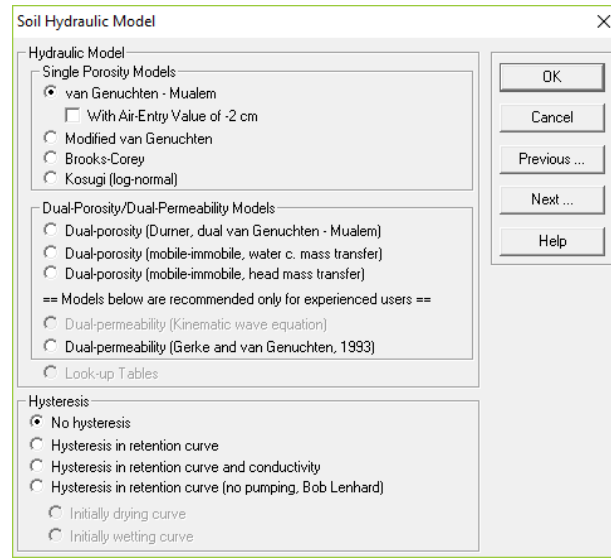


Figura 5. 6: Ventana Hydraulic Model de HYDRUS-1D.

Los parámetros hidráulicos del modelo van Genuchten-Mualem son diferentes para cada capa de material definido en la geometría del modelo.

A partir de los registros obtenidos en la parcela experimental y los valores obtenidos en el laboratorio se ha hecho una primera estimación de los parámetros hidráulicos. La Tabla 5.1 muestra los valores introducidos para proceder con la simulación inicial.

Tabla 5. 1: Parámetros hidráulicos introducidos para la simulación inicial.

Material	$\theta_r$ [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	$\theta_s$ [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	$\alpha$ [cm <sup>-1</sup> ]	$n$ [-]	$K_s$ [cm/d]	$l$ [-]
1	0.05	0.45	0.3	1.6	15	0.5
2	0.01	0.45	0.26	1.28	95	0.5
3	0.012	0.42	0.05	1.28	230	0.5

#### 5.1.6 Absorción a través de las raíces

El modelo escogido para simular la absorción del agua a través de las raíces es el de Feddes. En la Figura 5.7, se muestran las opciones seleccionadas para este modelo. Puede observarse que se ha considerado el índice de estrés hídrico de valor 1, puesto que se supone una captación de agua óptima sin provocarle estrés a la caña de azúcar.

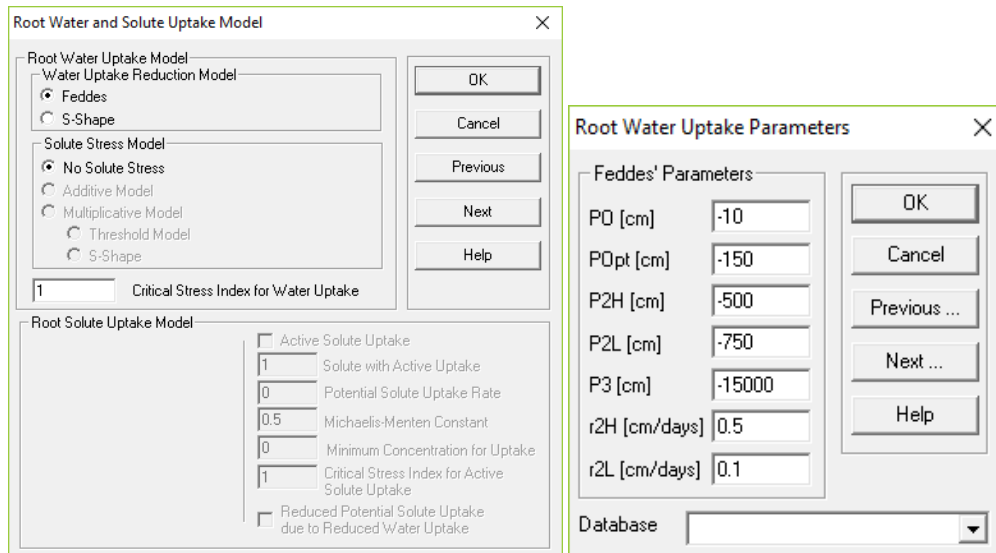


Figura 5. 7: Ventanas Root Water Uptake - Model y Parameters de HYDRUS-1D.

Los datos de extracción por las raíces de la caña de azúcar fueron proporcionados por Cenicaña. Respecto a los parámetros,  $P_0$ , es el valor de la succión matricial que da inicio a la absorción del agua;  $P_{Opt}$ , valor de la succión matricial en el que se produce la máxima absorción;  $P_{2H}$  y  $P_{2L}$ , valor límite de la succión matricial por debajo de la cual ya no se puede extraer agua a máxima velocidad (considerando el índice de transpiración potencial,  $r_{2H}$  y  $r_{2L}$ , respectivamente);  $P_3$ , es el valor de la succión matricial por debajo de la cual la absorción por las raíces cesa; y  $r_{2H}$  y  $r_{2L}$ , índice de transpiración potencial, asumidos por defecto como 0.5cm/d y 0.1 cm/d, respectivamente.

La captación del agua se supone cero si el suelo está próximo a la saturación y la succión matricial es menor que el punto de marchitez,  $P_3$ . La captación de agua es óptima entre las succiones  $P_{Opt}$  y  $P_2$ , mientras que para succiones matriciales entre  $P_2$  y  $P_3$  (o  $P_0$  y  $P_{Opt}$ ) la absorción decrece (o se incrementa) linealmente con el potencial matricial.

#### 5.1.7 Crecimiento de la planta

Dado que el ciclo de la caña de azúcar es complejo, el desarrollo de las raíces y la planta afecta a la absorción del agua, por lo que se debe considerar una función de crecimiento de las raíces.

Se ha especificado la información de la profundidad de las raíces a partir de la función logística de Verhulst-Pearl, en la que se describe el crecimiento de las raíces durante las estaciones. Los parámetros especificados se recogen en el Anejo B.

Cuando la profundidad de las raíces se calcula con este modelo de crecimiento, la distribución de la raíces que HYDRUS-1D establece por defecto es la de *Hoffman y van Genuchten, 1983*. En la Figura 5.8 se representa la distribución de la absorción del agua en las raíces y la expresión 5.1 la distribución de la raíces en el suelo propuesta por Hoffman y van Genuchten.

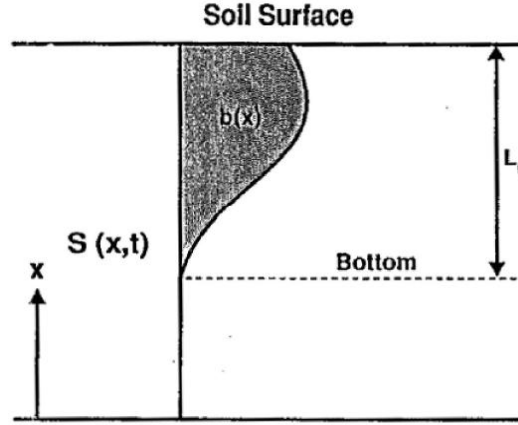


Figura 5. 8: Esquema de la función potencial de la distribución de absorción de agua en la zona de raíces (Šimůnek et al., 2013).

$$b(x) = \begin{cases} \frac{1.667}{L_r} & x > L - 0.2L_r \\ \frac{2.0833}{L_r} \left( 1 - \frac{L-x}{L_r} \right) & x \in (L - L_r; L - 0.2L_r) \\ 0 & x < L - L_r \end{cases} \quad (5.1)$$

Donde,  $L$ , es la coordenada  $x$  de la superficie del suelo [L]; y  $L_r$ , es la profundidad de la raíz [L].

Nota: el programa HYDRUS-1D no permite otra distribución cuando la profundidad de la raíces varía en función del tiempo. Por ello, pese que la distribución de las raíces de la planta sigue una distribución logNormal, como se ha visto en la Figura 4.7, el modelo la calcula como una distribución de Hoffman. La Figura 5.9 muestra una comparativa entra ambas distribuciones.

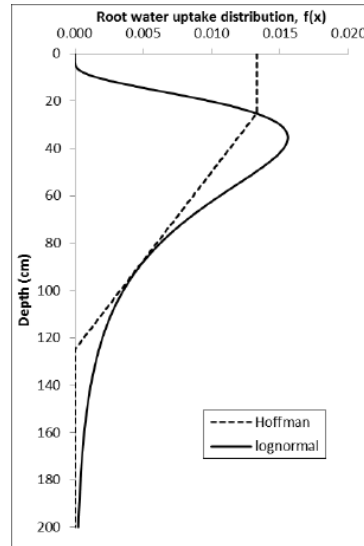


Figura 5. 9: Comparativa entre la distribución de Hoffman y la distribución logNormal en el cálculo de la distribución de las raíces en el suelo (Candela et al., 2016).

### 5.1.8 Condiciones iniciales y condiciones de contorno

Como se ha indicado anteriormente, las condiciones de contorno en el límite superior son las condiciones meteorológicas de la superficie y en el límite inferior el drenaje es libre.

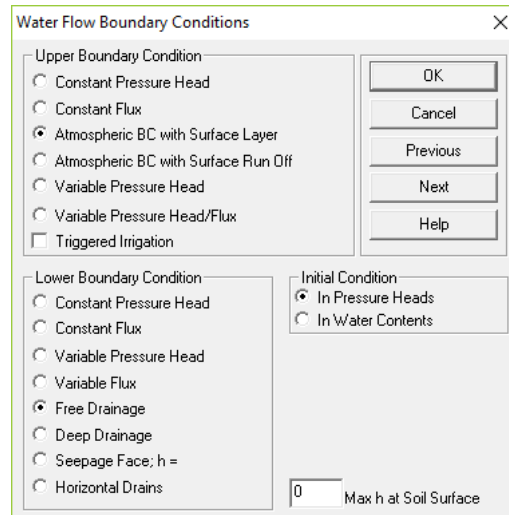


Figura 5. 10: Ventana Boundary Conditions de HYDRUS-1D.

La condición impuesta en el límite superior permite la acumulación del agua en la superficie, provocando que la altura de la lámina de agua aumente con la precipitación y disminuya con la infiltración y la evaporación. Se establece que la altura máxima del agua antes de iniciar el proceso de simulación sea de 0 cm.

La condición inicial se ha especificado para la succión matricial, definida como uniforme en todo el perfil y de valor -170 cm.

Los factores que afectan a las condiciones en la superficie del suelo son datos meteorológicos de precipitación, radiación solar, temperatura máxima y mínima, humedad relativa del aire, viento y luz solar. Los datos introducidos corresponden a los registros diarios obtenidos desde el 1/1/2008 al 4/5/2009, suponiendo un total de 490 días. En la Tabla 5.2 se muestran las condiciones meteorológicas introducidas.

Tabla 5. 2: Condiciones de contorno en la superficie del suelo. Datos diarios, 490 registros de cada variable.

Variable	Precipitación	Radiación	Temperatura	Humedad	Viento	Luz solar
Unidad	cm/día	MJ/m <sup>2</sup> /día	°C	%	km/día	h

Donde,

- La precipitación es la suma de los datos de lluvia y del riego de aplicación de la vinaza.
- La radiación solar son los valores de radiación global próximos a la parcela experimental.
- La humedad relativa y la velocidad del viento corresponden a los valores medios diarios.

Entre las variables, HYDRUS-1D pide especificar el valor de  $h_{CritA}$ , es decir, el valor absoluto de la presión matricial mínima permitida en la superficie del suelo. El valor establecido para todo el período de la simulación es de -100000 cm.

Los parámetros meteorológicos introducidos en el modelo son los de la Figura 5.11. Corresponden a los parámetros requeridos en la ecuación de Penman-Montheith para calcular la evapotranspiración potencial, usando variables relacionadas con la interceptación, el índice de área foliar (LAI, proporcionado por Cenicña) y el crecimiento de la planta.

**Meteorological Parameters**

**Radiation**  
☐ Potential Radiation ☒ Solar Radiation ☐ Net Radiation

**Geographical and Meteorological Parameters**  
Latitude (deg. N+S-) 3 Altitude (m) 994  
Angstrom values (short wave radiation):  
0.25 Angstrom value a 0.5 Angstrom value b  
Cloudiness effect on long wave radiation (set 0 if input trans. coeff.):  
0.9 a1 0.1 b1  
Cloudiness Factor from Solar Radiation:  
1.35 ac -0.35 bc  
Emissivity effect on long wave radiation:  
0.34 al -0.139 bl  
Measurement Heights: 400 Wind speed (cm) 400 Temperature (cm)

☒ Relative Humidity or ☐ Vapor Pressure specified

**Crop Data**  
☐ No Crop 30 Crop Height [cm]  
☐ Constant 0.23 Albedo  
☒ Tables 0 LAI/Surface Fraction  
☐ Daily 0 Root Depth [cm]  
15 Number of Growth Data  
Growth Data

**Leaf Area Index**  
☒ Given  
☐ From Crop Height, Clipped Grass  
☐ From Crop Height, Alfalfa  
☐ From Surface Fraction  
0.6219 Radiation Extinction

**Interception**  
☒ Interception  
1.5 Interception Constant [mm]

Buttons: OK, Cancel, Previous ..., Next ..., Help

**Cloudiness**  
☒ Sunshine  
☐ Cloudiness  
☐ Transmission c.  
☐ Solar Radiation

Figura 5. 11: Ventana Meteorological Parameters de HYDRUS-1D.

Toda la información en referencia al crecimiento de la caña de azúcar ha sido proporcionada por Cenicaña. En el Anejo B se puede consultar la información introducida en la descripción del desarrollo de la planta con la selección de 15 puntos en el ciclo de maduración de la caña.

### 5.1.9 Simulación inicial

Una vez introducidos todos los datos, se procede a ejecutar el modelo para ver la aproximación inicial de la simulación.

En la Figura 5.12 se puede ver la comparación entre la presión matricial registrada en la parcela experimental y la simulación inicial obtenida.

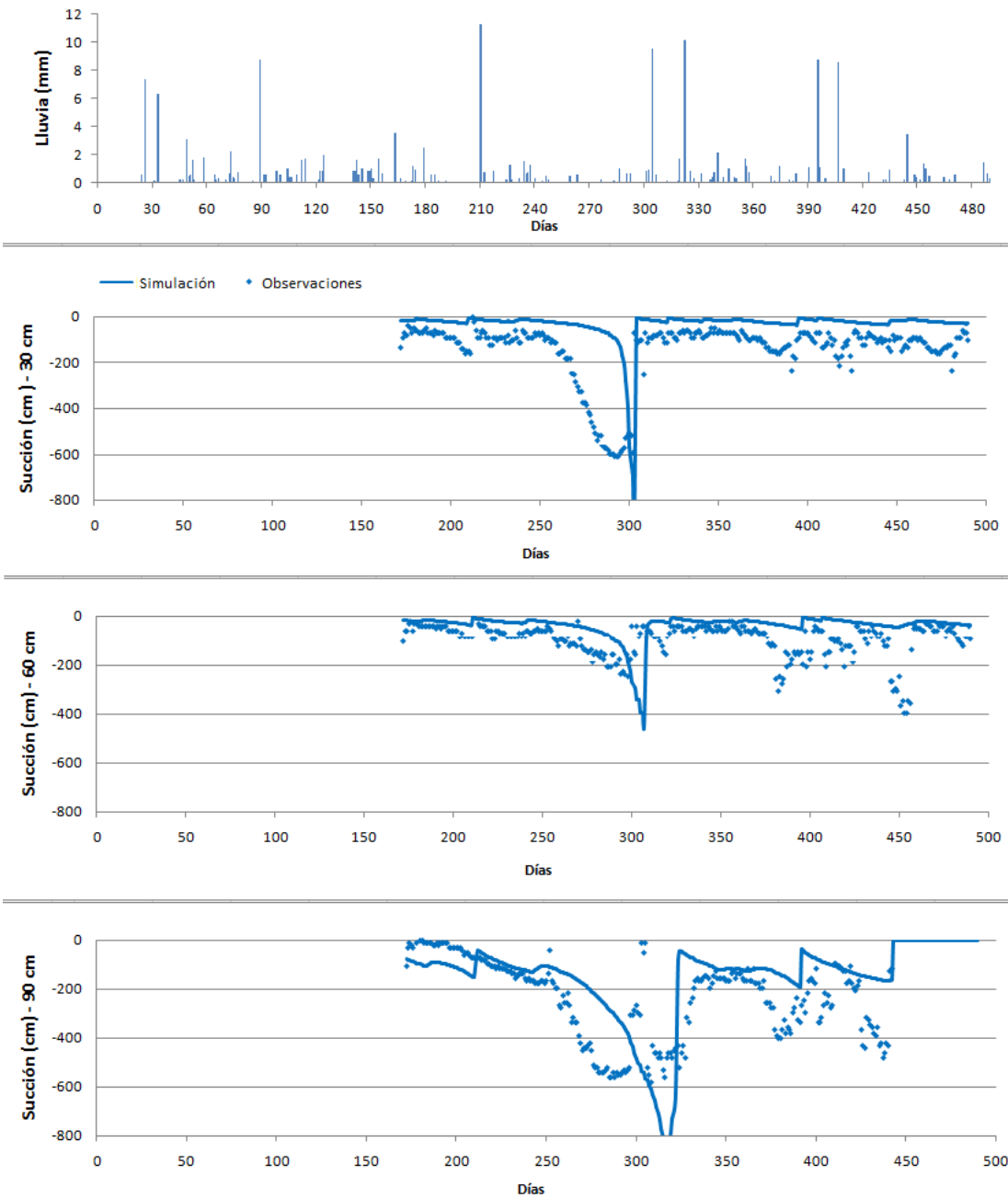


Figura 5. 12: Valores de precipitación y resultados obtenidos de la simulación inicial.

La simulación obtenida muestra una tendencia similar a las observaciones, pero difiere de los registros de campo, simulando picos de succión importantes y muy superiores a la succión medida. El valor de  $R^2$  resultante es de 0.31, un valor muy bajo. Por ello, se procede a calibrar el modelo.

## 5.2 Calibración

El objetivo de la calibración es modificar los parámetros establecidos para obtener un mejor ajuste entre simulación y observaciones. Se ha considerado hacerlo en dos fases: mediante una calibración manual y posteriormente, automática.

La calibración manual ha consistido en modificar los parámetros y los datos introducidos inicialmente en el modelo de manera metódica y considerando las diferentes alternativas de combinaciones entre las variables que intervienen en el flujo de la zona no saturada. Se han requerido más de 500 ejecuciones del programa para poder evaluar la influencia de las variables y mejorar la respuesta del modelo.

Para poder valorar la calidad del ajuste, se ha realizado una inspección visual comparativa entre los datos resultantes de la simulación de HYDRUS y los registros de succión *in situ* disponibles para cada una de las ejecuciones realizadas. Además, se ha analizado el valor de  $R^2$  para cada cambio realizado, buscando el coeficiente de determinación mayor y los mejores estadísticos.

HYDRUS solamente muestra los resultados simulados para poder compararlos con los introducidos a partir del modelo inverso (*Inverse Model*). Por eso, aunque la opción *Inverse Model* se utiliza para realizar el calibrado automático, también es necesaria en la calibración manual.

### 5.2.1 Estimación mediante modelo inverso

Al seleccionar la opción de *Inverse Model* en la ventana principal de *Main Processes*, se abre directamente una nueva ventana de *Inverse Solution*. En ella se deben escoger los parámetros a calibrar en función de las opciones seleccionadas en *Main Processes*. Además, también se debe especificar el número de iteraciones máximo y el número de datos a introducir para la función objetivo. La Figura 5.13 muestra las opciones seleccionadas del modelo inverso.

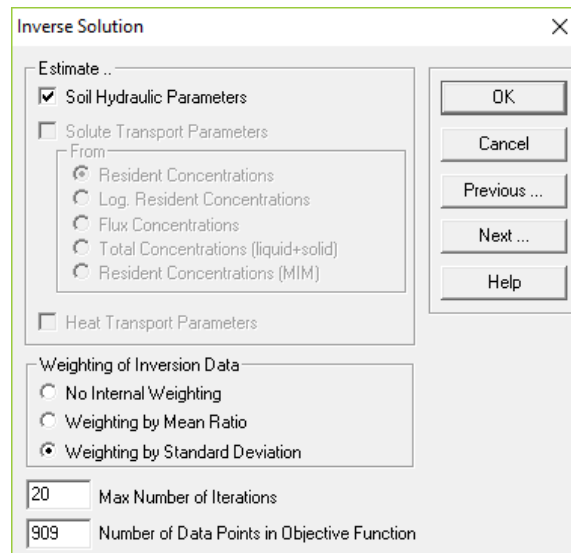


Figura 5. 13: Ventana *Inverse Solution* de *HYDRUS-1D*.

Los datos sobre los que se realiza el calibrado se introducen en la ventana *Data For Inverse Solution*. En la Figura 5.14 se muestra la introducción de los datos en el modelo inverso.

	X	Y	Type	Position	Weight
1	172	-133.1	1	1	1
2	173	-92.3	1	1	1
3	174	-71.9	1	1	1
4	175	-82.1	1	1	1
5	176	-41.4	1	1	1
6	177	-51.6	1	1	1
7	178	-71.9	1	1	1
8	179	-51.6	1	1	1
9	180	-61.8	1	1	1
10	181	-61.8	1	1	0.9
11	182	-71.9	1	1	1
12	183	-71.9	1	1	0.9
13	184	-71.9	1	1	0.9
14	185	-61.8	1	1	1
15	186	-51.6	1	1	1

☐ Show list boxes (not recommended for large data files)

Figura 5. 14: Ventana Data For Inverse Solution de HYDRUS-1D.

En esta ventana, el número de filas corresponde al número de entradas para la función objetivo, 909 entradas para este modelo; la columna X corresponde al tiempo en el que se registró el dato de succión, es decir, el día en el que se midió, siendo 1 el 1/1/2008 y 490 el 4/5/2009; la columna Y es el valor del dato de succión medido; la columna *Type* indica el parámetro al que corresponde el dato, en este caso, al calibrarse únicamente el parámetro de la succión matricial todos los registros corresponden a la succión; en la columna *Position* se indica la posición que ocupa el dato en el perfil vertical del suelo, es decir, define el punto de observación según la profundidad 1 (30 cm), 2 (60 cm) o 3 (90 cm); y por último, la columna *Weight* permite ponderar el dato introducido. En este caso se ha ponderado con 1 todos los valores de succión nuevos y con 0.9 los datos de succión repetidos, pues son registros anómalos o erróneos.

El modelo inverso modifica también la ventana para introducir los parámetros hidráulicos. Ahora el programa permite indicar para cada uno de los materiales los parámetros a calibrar y asignar valores máximos y mínimos para cada uno de ellos. Se pueden calibrar hasta 15 parámetros simultáneamente, pero se recomienda calibrar pocos parámetros a la vez para así no tener problemas de convergencia.

### 5.2.2 Ajuste de sensibilidad

A partir de los resultados obtenidos en la simulación inicial y con las consideraciones hechas en el modelo inverso, se procede a realizar un ajuste de sensibilidad considerando algunos cambios para encajar con la realidad en la parcela.

Los datos de crecimiento de la planta (Anejo B) se han modificado en algunos puntos. La Tabla 5.3 presenta las variaciones realizadas.

Tabla 5. 3: Datos modificados del crecimiento de la caña de azúcar.

Puntos	Tiempo [días]	Altura caña [cm]	Albedo [-]	LAI/SCF [-]	Raíces [cm]
1	22	10	0.23	0.16	20
2	56	20	0.23	2	40
6	176	140	0.23	4.9	60
9	287	280	0.23	5	100



### 5.2.3 Calibración manual

Los parámetros hidráulicos del suelo  $\alpha$ ,  $n$  y  $K_s$  son los que más influyen en el flujo del agua y los que presentan más incerteza, por lo que se han modificado individualmente durante la calibración manual. Los valores que ofrecen un mejor ajuste son los mostrados en la Tabla 5.4.

Tabla 5. 4: Parámetros hidráulicos obtenidos en la calibración manual.

Material	$\theta_r$ [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	$\theta_s$ [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	$\alpha$ [cm <sup>-1</sup> ]	$n$ [-]	$K_s$ [cm/d]	$l$ [-]
1	0.05	0.45	0.2	1.81	154	0.5
2	0.01	0.45	0.26	1.28	95	0.5
3	0.012	0.42	0.05	1.28	264	0.5

Se puede concluir que las modificaciones respecto la simulación inicial son:

- Ponderar los valores repetidos o erróneos de los registros de succión con un peso de 0.9, respecto al valor de 1 de los datos considerados como buenos.
- Modificar algunos puntos de crecimiento reajustando la altura de la caña de azúcar a lo largo de su maduración.
- Calibrar manualmente el modelo y obtener unos parámetros hidráulicos de  $\alpha$ ,  $n$  y  $K_s$  diferentes que ajusten la simulación.

### 5.2.4 Calibración automática

Dado que el programa HYDRUS-1D recomienda calibrar pocos parámetros a la vez para no tener problemas de convergencia, se ha considerado hacerlo en dos partes: primero, calibrar la conductividad hidráulica saturada,  $K_s$ , y el valor de la entrada de aire,  $\alpha$ , y después, calibrar la distribución del tamaño de poros,  $n$ .

Los resultados y toda la información referente a la simulación realizada se encuentran en el archivo *Fit.OUT* que genera HYDRUS-1D, donde se pueden consultar los datos simulados del *Post-Processing* del modelo y los errores respecto a los datos observados.

En la Figura 5.15 se pueden observar los intervalos introducidos para cada parámetro en cada una de las capas. Para ello, se han considerado los valores obtenidos a partir de las muestras y la posible dispersión que puedan presentar dichos parámetros en la realidad. De todos modos, las únicas variables calibradas automáticamente han sido las mencionadas anteriormente.

Material 1	Qr	Qs	Alpha	n	Ks	l
Initial Estimate	0.05	0.45	0.3	1.6	15	0.5
Minimum Value	0	0.35	0.05	1.1	1	0
Maximum Value	0.1	0.51	1	1.9	300	0
Fitted ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Material 2	Qr	Qs	Alpha	n	Ks	l
Initial Estimate	0.01	0.45	0.26	1.28	95	0.5
Minimum Value	0	0.35	0.05	1.1	40	0
Maximum Value	0.13	0.51	1	1.9	1000	0
Fitted ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Material 3	Qr	Qs	Alpha	n	Ks	l
Initial Estimate	0.012	0.42	0.05	1.28	230	0.5
Minimum Value	0	0	0.05	1.1	60	0
Maximum Value	0.07	0.4	0.5	1.9	2000	0
Fitted ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 5. 15: Intervalos de los parámetros hidráulicos en el modelo inverso.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de la simulación inicial y realizando los cambios descritos anteriormente durante la calibración manual, se han obtenido los resultados de la Figura 6.1.

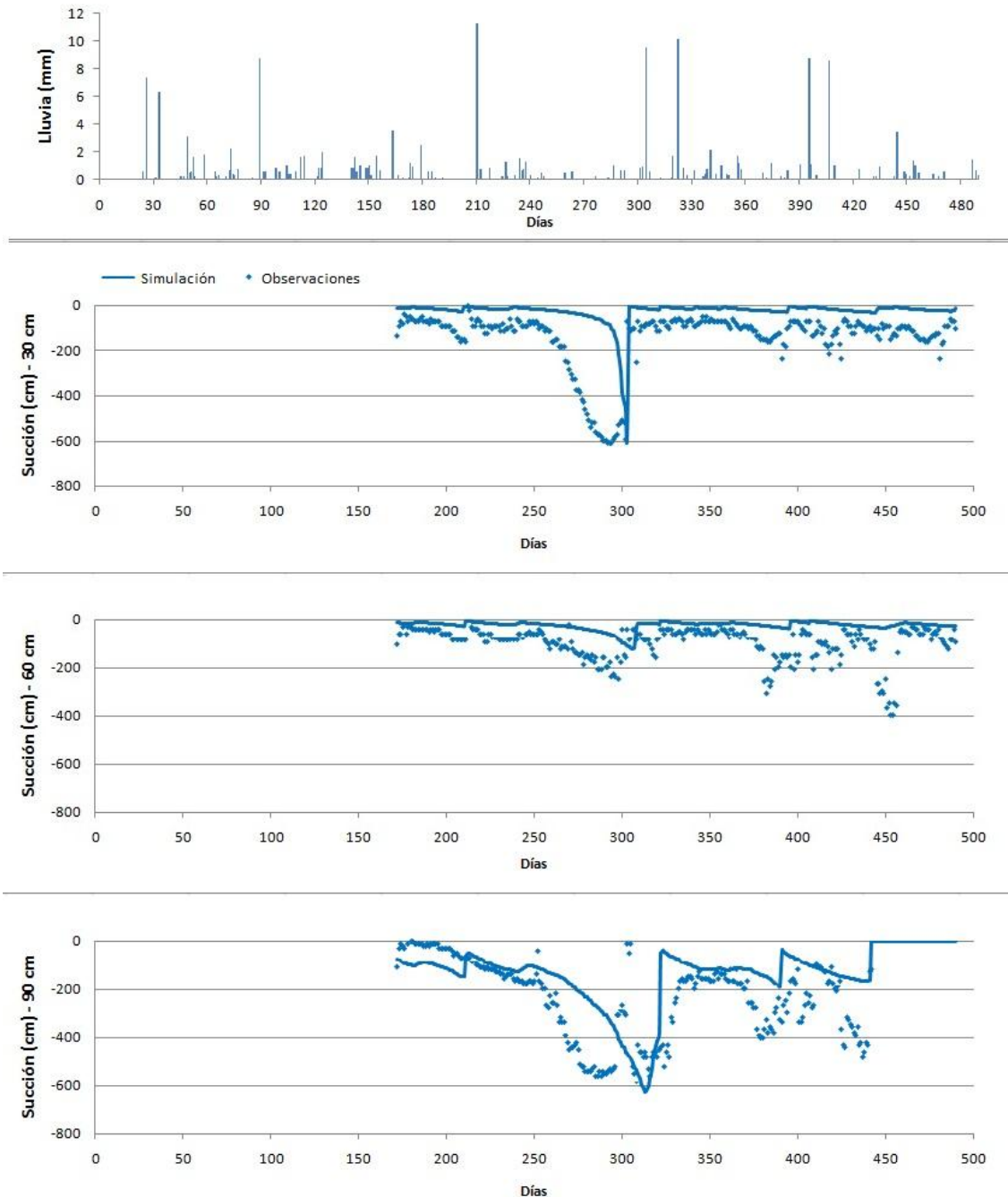


Figura 6. 1: Valores de precipitación y resultados obtenidos del modelo calibrado manualmente.

Como se puede ver, esta modelación reproduce mejor los registros de succión que la simulación inicial. Se observa un mejor ajuste en la tendencia del modelo y en los cambios de potencial matricial, así como una buena generación de los puntos más altos y más bajos de succión. El valor de  $R^2$  es de 0.366 que, aunque sigue siendo muy bajo, ha aumentado respecto a la primera modelación. Los estadísticos calculados son los mostrados en la Tabla 6.1.

Tabla 6. 1: Estadísticos del modelo calibrado manualmente.

Profundidad	RMSE	EF	MAE
30 cm	163.14	-0.54	120.45
60 cm	98.79	-1.04	76.42
90 cm	159.63	0.06	122.68

De todos modos, esta modelación sigue simulando valores alejados de los resultados obtenidos in situ. En general, se aprecian succiones menores y los picos de mayores succiones no se ajustan a los observados in situ. Se advierte además, la existencia de un desfase de tiempo entre la simulación y las observaciones en campo en las succiones mayores, ya que los cambios de potencial matricial se presentan con un cierto retardo en el modelo y se producen más rápido y de manera brusca.

En definitiva, se puede deducir que el contenido de agua en el suelo de la parcela experimental es mayor que el simulado y, además, el suelo del modelo permite una transferencia de agua mayor y su flujo es más rápido. A partir de estas conclusiones, se ha decidido modificar los datos de la planta para procurar ajustar la absorción de las raíces de la caña de azúcar.

El reajuste del calibrado manual se ha realizado modificando los parámetros de Feddes, indicativos de la toma de agua de la planta. Éstos valores se han modificado teniendo en cuenta la limitación de medida de los tensiómetros, ya que solo pueden registrar un máximo de 0.8 a 0.9 bares (800 - 900 cm de columna de agua). Los nuevos valores considerados son los de la Figura 6.2.

Figura 6. 2: Nuevos parámetros de Feddes.

Donde, el valor P3 se ha reducido significativamente en función del valor máximo que pueden medir los tensiómetros instalados en la parcela; y P2H y P2L, se han seleccionado según los parámetros de Feddes de la caña de azúcar incluidos en la base de datos de HYDRUS.

En la Figura 6.3 se exponen los resultados producidos en los que se aprecia un mejor ajuste en comparación con la calibración manual. La simulación es más suave y se ajusta mejor a la evolución de las succiones de campo. La tendencia está mejor representada, los cambios de succión son más lentos y se producen en el mismo momento que los observados, por lo que el desfase de tiempo se ha corregido respecto a la calibración manual.

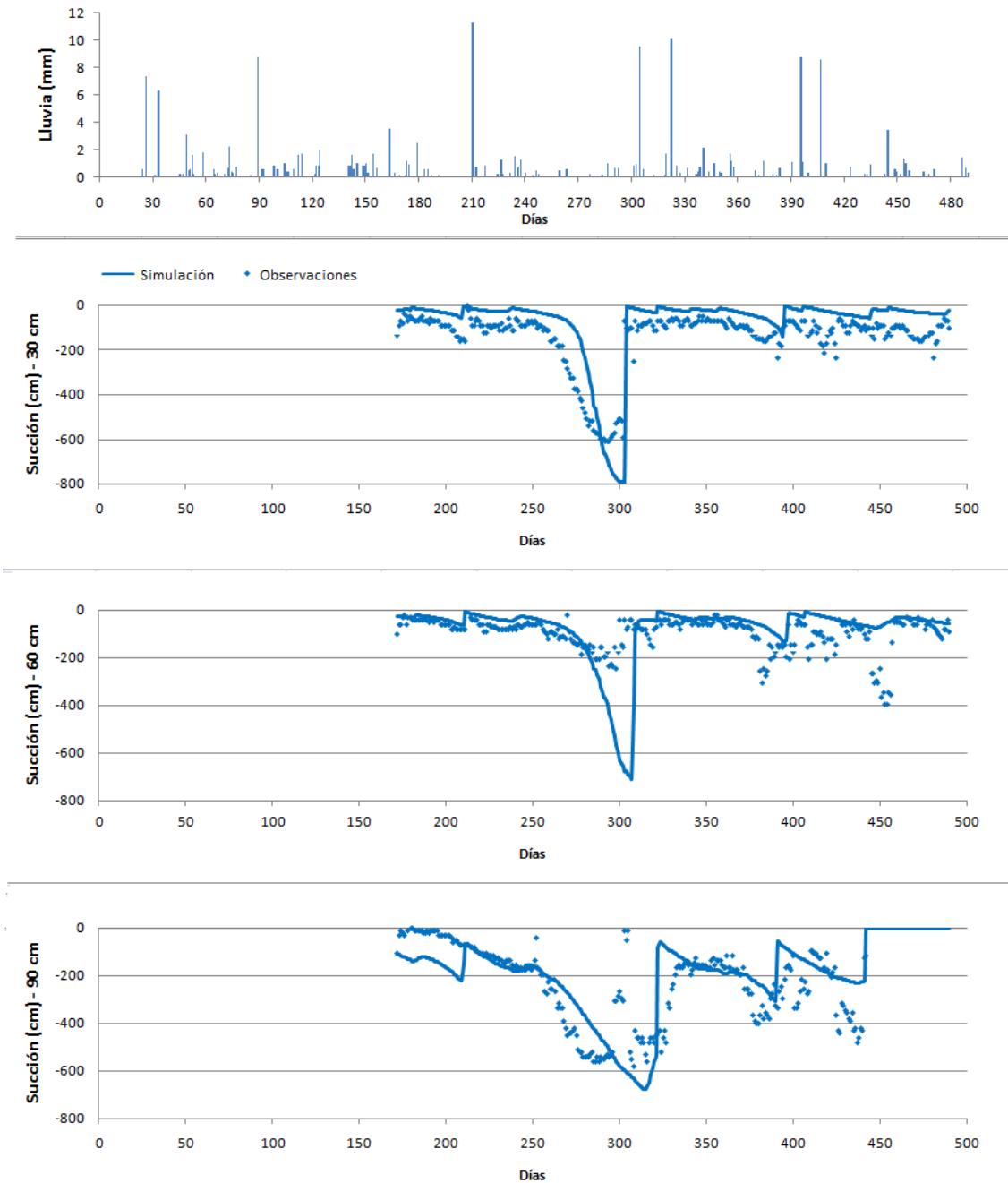


Figura 6. 3: Valores de precipitación y resultados obtenidos del modelo calibrado manualmente con los parámetros de Feddes modificados.

En el punto de observación correspondiente al tensiómetro de 30 cm de profundidad, la mejora es significativa. Se genera una succión progresiva, amoldada a la tendencia de los datos reales y los cambios en el flujo del agua suceden antes que en la simulación de la calibración manual. Aun así, el modelo simula un pico máximo mayor al valor observado.

En la profundidad de 90 cm también se aprecia una mejora, pues los valores límite están bien representados y la tendencia del potencial matricial concuerda con las medidas reales.

En cambio, el punto de observación de 60 cm aunque mejora en los aspectos de suavidad en los cambios y simultaneidad de máximos, sobreestima la máxima succión, suponiendo succiones de

-700 cm de columna de agua cuando en la realidad se observó un valor inferior a -300 cm de columna de agua en el mismo período de tiempo.

El valor obtenido de  $R^2$  es de 0.464 y los estadísticos resultantes son los que se muestran en la Tabla 6.2. Se presenta todavía un coeficiente de determinación bajo y se distingue una mejora en los estadísticos de las profundidades de 30 cm y de 90 cm, pero el ajuste en la capa intermedia empeora respecto a la simulación anterior.

Tabla 6. 2: Estadísticos del modelo calibrado manualmente con los parámetros de Feddes modificados.

Profundidad	RMSE	EF	MAE
30 cm	107.58	0.33	86.69
60 cm	131.50	-2.62	71.46
90 cm	139.33	0.28	101.33

Para la calibración automática se ha partido de la calibración con los valores de Feddes modificados. En una primera fase se han calibrado los parámetros hidráulicos  $\alpha$  y  $K_s$  y a partir de estos se ha calibrado  $n$ . La Tabla 6.3 muestra los valores calibrados que ha generado HYDRUS-1D.

Tabla 6. 3: Valores de  $\alpha$ ,  $K$  y  $n$  obtenidos en la calibración automática.

Material	$\alpha$	$K_s$	$n$
1	0.243	300	1.74
2	0.111	40	1.27
3	0.056	766.8	1.30

El resultado de la simulación después de la calibración automática de los parámetros hidráulicos se muestra en la Figura 6.4.

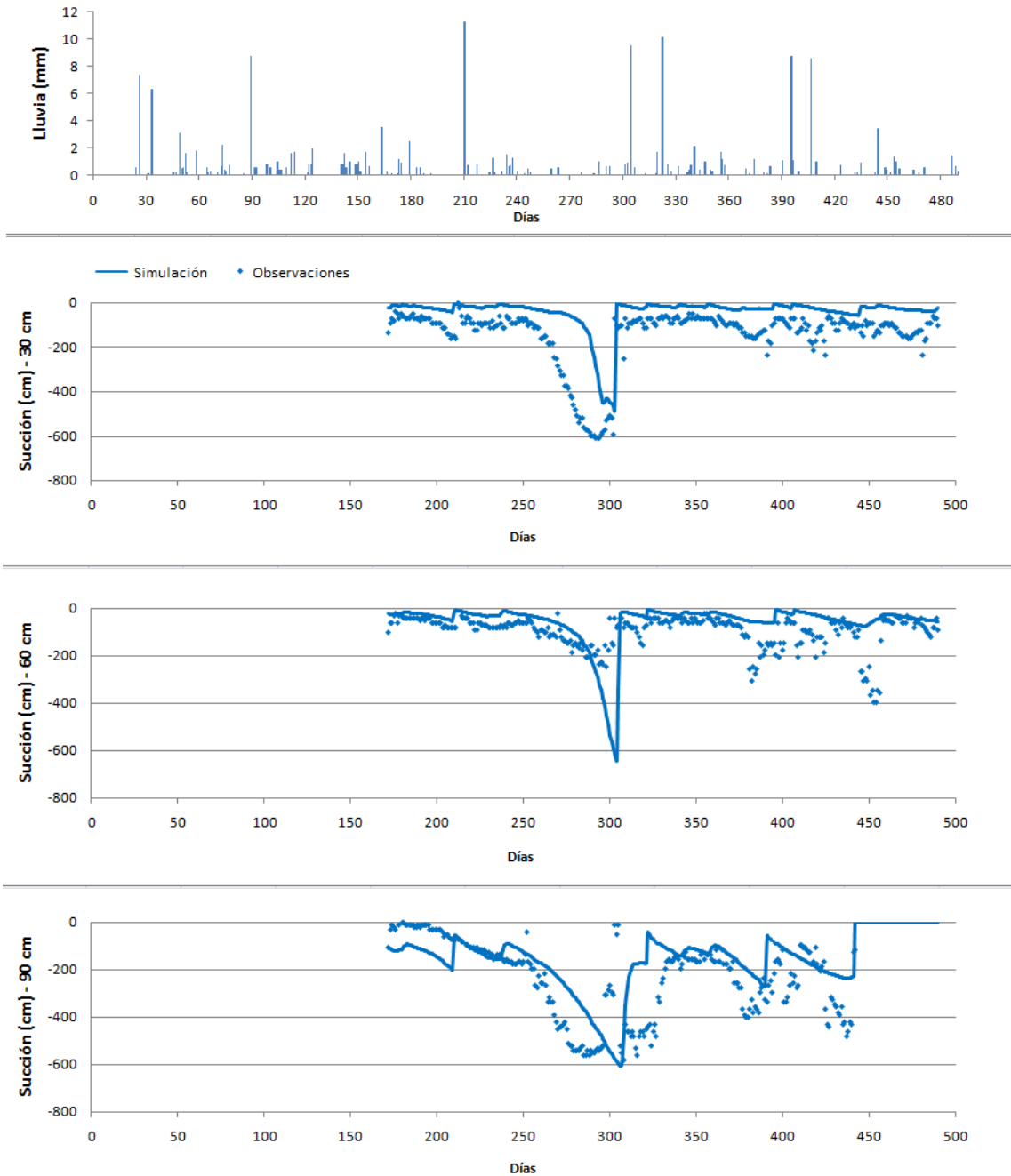


Figura 6. 4: Valores de precipitación y resultados obtenidos del modelo calibrado automáticamente con los parámetros de Feddes modificados.

Como se puede ver, el ajuste a la succión medida es peor al obtenido en la calibración manual y el valor de  $R^2$  es de 0.358, siendo muy bajo y menor a los hallados anteriormente.

Con el modelo inverso de HYDRUS-1D solamente se puede calibrar automáticamente los parámetros hidráulicos. El cálculo se realiza suponiendo como válidos el resto de variables introducidas y los parámetros que propone el programa automáticamente deben ser los que mejor ajusten el modelo a los datos registrados en la parcela experimental. Por todo ello, se puede interpretar que los parámetros hidráulicos del suelo en el área de estudio se acercan más a los hallados durante la calibración manual y presentados en la Tabla 5.4 que a los que calcula HYDRUS.

De todos modos, dado que el modelo calibrado manualmente con los datos de Feddes modificados tampoco acaba de ajustarse perfectamente a los registros in situ y se ha visto que la simulación genera succiones menores que las observadas, se deduce que la simulación no reproduce bien el contenido de agua en el suelo de la parcela y la pérdida de agua del terreno.

Surgen pues dos cuestiones a resolver para generar un buen modelo: determinar bien los términos de entrada de agua en el terreno y controlar las pérdidas.

Respecto a la existencia de humedad, puede deberse a la entrada de agua por ascenso capilar. Como se ha visto en el perfil litológico de la parcela, las capas inferiores de la zona no saturada tienen una textura más arenosa que facilitan el flujo de agua. En este sentido, podría suceder que en la zona no saturada se produjeran flujos ascendentes, ya que el flujo se da en todas las direcciones. Del mismo modo, en las capas superiores predominan la existencia de limos, que dificultan el paso del agua y la porosidad es menor. Por esto, podrían producirse encharcamientos en la parte superior de la zona no saturada e incluso en la superficie.

Con referencia a las pérdidas de agua, el programa presenta algunas limitaciones respecto a la distribución de las raíces y la absorción del agua a través de ellas. Estas limitaciones advertidas durante la introducción de los datos en el modelo ya indican un error previo en la simulación y acotan la posibilidad de generar una buena aproximación. De todos modos, el ciclo de crecimiento y desarrollo de la caña de azúcar es muy complejo de simular numéricamente por lo que la captación del agua en las raíces puede suponer un error significativo.

Se debe considerar también, que HYDRUS genera los resultados simulados teniendo en cuenta las pérdidas por evapotranspiración, calculadas a partir de la ecuación de Penman-Monteith. HYDRUS permite introducir los datos de la evapotranspiración como una variable más, esto podría suponer una mejora en la calidad de los datos reproducidos. Se requeriría pues un estudio de la evapotranspiración en la parcela experimental con registros reales y la obtención de valores válidos.

A pesar de estas deducciones, se ha decidido usar el mejor modelo obtenido para estimar una recarga aproximada del acuífero. El resultado se presenta en la Figura 6.5 cuyos datos se han obtenido del *Post-Processing* de HYDRUS.

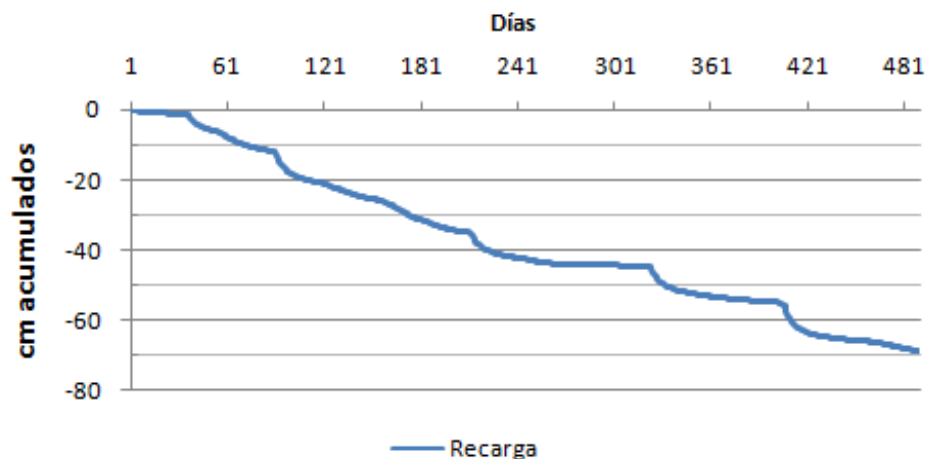


Figura 6. 5: Recarga acumulada (en cm) durante el período calibrado.

Para el período calibrado, la recarga acumulada es de unos 700 mm. Es bastante elevada considerando que el agua de entrada de precipitación y riego es superior a 1770 mm, correspondiente a un 39% de la entrada. Dado que la simulación utilizada sobreestima la succión es de suponer que la recarga real será menor. De todos modos, debe considerarse que es una recarga aproximada puesto que previamente debería hacerse una validación del modelo en otro período de tiempo y con otras condiciones de contorno, para corroborar su consistencia.



## 7. CONCLUSIONES

A lo largo de los apartados que conforman el presente documento se han descrito los pasos seguidos para cumplir con los objetivos planteados inicialmente.

Se han estudiado previamente los aspectos teóricos de la zona no saturada para analizar los procesos y las variables. Se ha confirmado que su caracterización es muy compleja pues las variables están muy interrelacionadas, lo que dificulta su determinación y control. Se ha procedido estudiar una parcela instrumentada cultivada con caña de azúcar situada en el Valle del Cauca en Colombia para analizar el flujo del agua a través de la zona no saturada.

Los datos y la instrumentación de la parcela la ha realizado la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). Gracias a su trabajo se han podido obtener muestras representativas del terreno y han proporcionado los datos necesarios para poder realizar este proyecto. Las características físicas y químicas de la parcela experimental obtenidas de los ensayos in situ y en laboratorio han permitido definir el modelo conceptual cuyas capas superiores están formadas por materiales limosos y según aumenta la profundidad son más arenosas y permeables, con una conductividad hidráulica mayor.

La disponibilidad de los datos ha sido muy variable a lo largo del tiempo de monitoreo. La instrumentación de la parcela se inició en 2008 con periodos en los que no se ha podido registrar la succión en los tensiómetros. Además, la aplicación de vinaza tuvo comienzo antes (en 2006). Por ello, el período de calibración del modelo se ha realizado con los registros más completos de datos meteorológicos, datos de succión matricial en el suelo y aplicación de vinaza en la parcela. Finalmente, se ha establecido la calibración para el 20/6/2008 al 4/5/2009.

Debe destacarse que en la obtención de los datos, los parámetros relacionados con la absorción de la planta (parámetros de Feddes) han sido muy difíciles de determinar, puesto que el ciclo de crecimiento y maduración de la caña de azúcar, así como sus raíces y su desarrollo, es muy complejo de expresar numéricamente y puede inducir a errores en la generación del modelo.

El modelo usado para analizar el movimiento del agua ha sido el propuesto por van Genuchten y Mualem y la evapotranspiración ha sido calculada a partir del método de Penman-Monteith, todos ellos incluidos en HYDRUS. La evapotranspiración se ha obtenido a través del propio programa a partir de las condiciones de contorno de la superficie introducidas, constituyendo una limitación más para la obtención de buenos resultados.

Durante la introducción de los datos en la simulación se han detectado limitaciones derivadas de la distribución de las raíces para especificar la absorción del agua intersticial a través de ellas. El programa establece por defecto la distribución de Hoffman, pese a que a escala real se ha observado una distribución de las raíces logNormal. Este hecho también implica una limitación para hallar un buen ajuste del modelo a los datos de campo.

A partir del análisis de resultados, se ha observado mejor simulación mediante calibración manual que la obtenida en la calibración automática. HYDRUS realiza una aproximación de los parámetros hidráulicos en función de los datos introducidos de la planta (absorción, crecimiento...), las condiciones de contorno (precipitación, temperatura, humedad, radiación

solar, viento, drenaje libre...) y la discretización temporal y espacial. De hecho, que la simulación durante la calibración manual sea mejor que la automática propuesta por el programa indica que los parámetros hidráulicos fijados en la calibración manual se ajustan mejor a los parámetros reales del suelo de la parcela y, por tanto, el error asociado se corresponde a otros parámetros.

A partir de la consecución de un modelo consistente se puede hallar la recarga que produce el flujo de agua de la zona no saturada al acuífero. La recarga obtenida a partir de la simulación parece muy elevada (39% de la precipitación para el período seleccionado), en comparación con otros datos disponibles en la zona. De todos modos, este valor elevado de recarga es coherente con el modelo, dado la sobreestimación obtenida de la succión.

Debe destacarse que los datos simulados presentan siempre menor succión que la medida in situ. Ello puede atribuirse a dos efectos: por un lado, que los datos de salida de agua de la zona no saturada no sean los adecuados, debido a que los registros meteorológicos o la captación de agua en las raíces es menor que la definida; o bien, que en la zona no saturada se produzca ascenso capilar, difícil de verificar que no se han detectado o quizás el terreno se encharque fácilmente dado las capas limosas cercanas a la superficie y la succión sea inferior debido a la retención del agua en el suelo.

Una posible solución para mejorar el modelo incluiría el cálculo independiente de la evapotranspiración y su inclusión como input en HYDRUS. De este modo, los datos serían reales y no se requeriría simularlos.

### **7.1 Trabajo futuro**

A lo largo del trabajo se han tratado de solventar las dificultades surgidas. Algunas, por estar fuera de los límites del estudio, no se han desarrollado rigurosamente y se han explicado únicamente las actuaciones que deberían realizarse para procurar solucionarlas. Otras se han podido resolver a partir de la aplicación de los conocimientos aprendidos a lo largo de la formación como estudiante del Grado de Ingeniería Civil y el aprendizaje complementario individual para comprender la complejidad de los temas aquí tratados. En conclusión, todas ellas pretenden simplificar y plantear la dirección que debe llevar un trabajo futuro para evaluar el flujo en la zona no saturada y estudiar el impacto de los fertilizantes en el agua subterránea.

El objetivo principal del conjunto del proyecto es conocer el efecto de la vinaza sobre el acuífero y la vulnerabilidad de éste a ser contaminado. El estudio presentado plantea las bases para generar el modelo que reproduzca el flujo del agua y, consecuentemente, el transporte de los contaminantes de la superficie al agua subterránea a través de la zona vadosa. A partir de la obtención de un modelo consistente que simule de una manera fidedigna los procesos que ocurren en el subsuelo se puede conocer la vulnerabilidad potencial del acuífero. Para poder comprobar la consistencia del modelo propuesto, debería realizarse la validación del modelo, procedimiento habitual en la modelación que no ha podido ser realizado en este estudio por limitación de tiempo disponible. Sería deseable que el código pudiera modificarse para poder introducir modelaciones complejas como la presentada aquí, ello incluye por ejemplo permitir incluir modelos de crecimiento de la raíz distintos del propuesto por el código.

Como segunda fase, a través del estudio de los compuestos químicos de las vinazas y su transporte a través del suelo se simularían las reacciones en la zona no saturada y su impacto al

acuífero. El análisis de estos factores son de gran importancia para prevenir la contaminación de las aguas subterráneas ya que éstas dan servicio a las actividades rurales, industriales y urbanas de las poblaciones del Valle del Cauca y podrían poner en riesgo los habitantes de las regiones colindantes.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amaya, A., Cock, J. H., Hernández, A., Irvine, J., 1995. Biología. Cenicaña. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Centro de investigación de la caña de azúcar de Colombia, Cali, p. 31-62.
- Candela, L., Valdés-Abellán, J., Jiménez-Martínez, J., Bellés, X., 2016. Modelación numérica del flujo en la zona no saturada. Parcela Hacienda Real (Cali, Colombia). Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (no publicado), UPC, 22 pp.
- Candela, L., Varela, M., 1993. La zona no saturada y la contaminación de las aguas subterráneas: teoría, medición y modelos. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, 322 pp.
- Chaves, M.A., 1985. Las vinazas en la fertilización de la caña de azúcar. *Boletín informativo*, 43(21), p.59-61.
- Custodio, E., Llamas, M.R., 1976. Hidrología subterránea, 2 tomos. Ediciones Omega, Barcelona, 2350 pp.
- CVC, 2012. Determinación de los efectos de la aplicación de vinazas en la zona no saturada, aguas subterráneas y definición de protocolos de manejo sostenible en el Valle del Cauca. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, Santiago de Cali, Colombia, p. 357.
- F.A.O., 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (Estudio FAO riego y drenaje nº 56). Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. Roma, p. 15-86.
- Feddes, R. A., Raats, P.A.C., 2004. Parameterizing the soil - water - plant root system. Unsaturated-zone Modeling. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 95-141.
- Legates, D. R., McCabe, G. J., 1999. Evaluating the use of "goodness-of-fit" Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35, p. 233-241.
- Nanía, L. S., Gómez, M., 2006. Ingeniería Hidrológica. Grupo Editorial Universitario, Granada, 278 pp.
- Oliver, X., Agelet de Saracibar, C., 2002. Mecánica de medios continuos para ingenieros. Edicions UPC, Barcelona, 329 pp.
- Ortegón, G.P., Muñoz, F., Candela, L., Tamoh, K., Valdes-Abellan, J., 2016. Vinasse application to sugar cane fields. Effect on the unsaturated zone and groundwater at Valle del Cauca (Colombia). *Science of the Total Environment*, 539, p.410-419.

- Roth, K., 2007. Soil Physics. Lecture Notes. Institute of Environmental Physics, University of Heidelberg, 340 pp.
- Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M. and van Genuchten, M. Th., 2013. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solute in variably-saturated media. Version 4.16. Dep. of Environ. Sci., University of California Riverside, California, p. 343.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M. Th., Šejna, M., 2016. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. Dep. of Environ. Sci., University of California Riverside, California, 59 pp.
- Tindall, J.A. and Kunkel, J.R., 1999. Unsaturated zone hydrology for scientists and engineers. Upper Saddle River, N.J. Prentice Hall, 624 pp.
- Vadillo, I., Bedbur, E., 2006. Biogeochemical dynamics from soil to groundwater. Department of Geology, University of Malaga, 205 pp.
- Wood, D.W., 1990. Soil mechanics: a one-dimensional introduction. Cambridge University Press, Cambridge, 239 pp.

## **ANEJOS**

### **ANEJO A. DATOS DISPONIBLES**

### **ANEJO B. MODELACIÓN EN HYDRUS-1D**

- Discretización espacial
- Discretización temporal
- Criterios de iteración
- Crecimiento de la planta
- Condiciones iniciales
- Condiciones de contorno

### **ANEJO C. ARCHIVOS HYDRUS-1D**

## ANEJO A. DATOS DISPONIBLES

La CVC y Cenicaña han proporcionado los datos necesarios para construir el modelo descrito. Su disponibilidad varía mucho en 10 años (2006 - 2016). En la Figura A.1 se recogen todos los datos disponibles a lo largo de la última década. A partir de este gráfico se ha podido establecer el período de calibrado del modelo, procurando seleccionar el intervalo de tiempo mayor con los registros más completos disponibles.

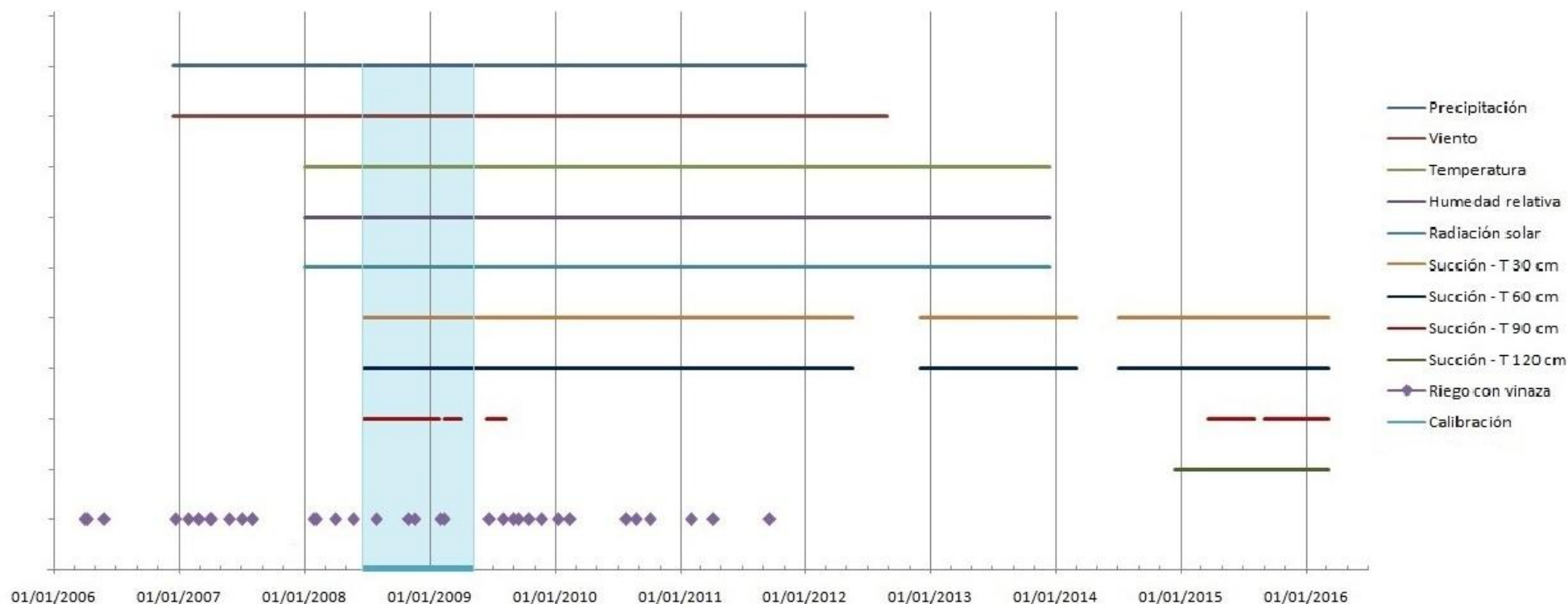


Figura A. 1: Disponibilidad de los datos meteorológicos, succión medida con tensiómetros y fechas de aplicación del riego con vinaza.  
Período de calibración: 20/6/2008 - 4/5/2009.

## ANEJO B. MODELACIÓN EN HYDRUS-1D

Este anejo pretende recoger detalles específicos de los pasos seguidos durante la elaboración del modelo en HYDRUS-1D. Se describen criterios y consideraciones tomadas durante el proceso que forman parte del modelo pero se han decidido separar para simplificar las explicaciones en la memoria.

### Discretización espacial

En la Figura B.1 se muestra la malla definida que se ajusta mejor al modelo resultando una malla uniforme de 101 nudos y 100 elementos de ancho y densidad constante.

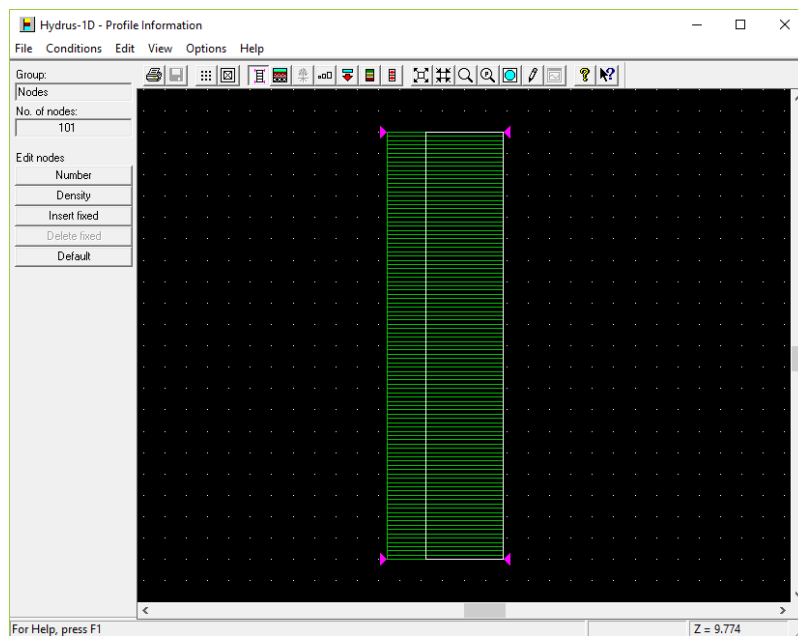


Figura B. 1: Definición de la discretización espacial en la ventana Profile Information de HYDRUS-1D.

### Discretización temporal

HYDRUS-1D permite elegir el tiempo en el que el programa debe almacenar y mostrar los resultados de la simulación. La Figura B.2 muestra las opciones seleccionadas.

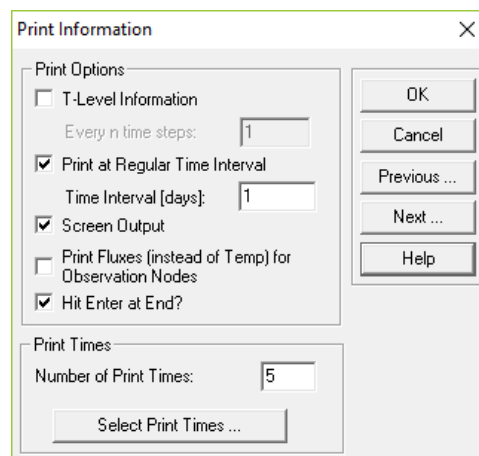


Figura B. 2: Ventana Print Information de HYDRUS-1D.



Los datos resultantes después de la simulación son diarios y se pueden ver durante el proceso de ejecución del modelo. Además, se han definido 5 tiempos en los que se detalla información específica. Estos 5 momentos temporales son los mostrados en la Figura B.3.

	1	2	3	4	5
Print Times [days]	100	200	300	400	490

Figura B. 3: Ventana Print Times de HYDRUS-1D.

### Criterios de iteración

La Figura B.4 muestra las criterios establecidos de iteración, donde los valores son los recomendados por defecto por HYDRUS, a excepción del número máximo de iteraciones que se ha modificado de 10 a 20.

Iteration Criteria	Value
Maximum Number of Iterations	20
Water Content Tolerance	0.001
Pressure Head Tolerance [cm]	1
Lower Optimal Iteration Range	3
Upper Optimal Iteration Range	7
Lower Time Step Multiplication Factor	1.3
Upper Time Step Multiplication Factor	0.7
Lower Limit of the Tension Interval [cm]	1e-006
Upper Limit of the Tension Interval [cm]	10000

Figura B. 4: Ventana Iteration Criteria de HYDRUS-1D.

### Crecimiento de la planta

Para definir la profundidad de las raíces se ha usado la función logística de Verhulst-Pearl. Los parámetros establecidos se presentan en la Figura B.5.

Parameter	Value
Root Depth Specified	Using a Growth Function
Root Growth Factor	From Given Data
Initial Root Growth Time [days]	22
Harvest Time [days]	490
Initial Rooting Depth [cm]	0.01
Maximum Rooting Depth [cm]	100
Time - Root Data [days]	23
Depth - Root Data [cm]	1
Time-Period [days]	490

Figura B. 5: Ventana Root Growth Parameter de HYDRUS-1D.

### Condiciones iniciales

La condición inicial se ha especificado para la succión matricial. En la Figura B.6 se puede ver su distribución uniforme a lo largo del perfil con valor de -170 cm.

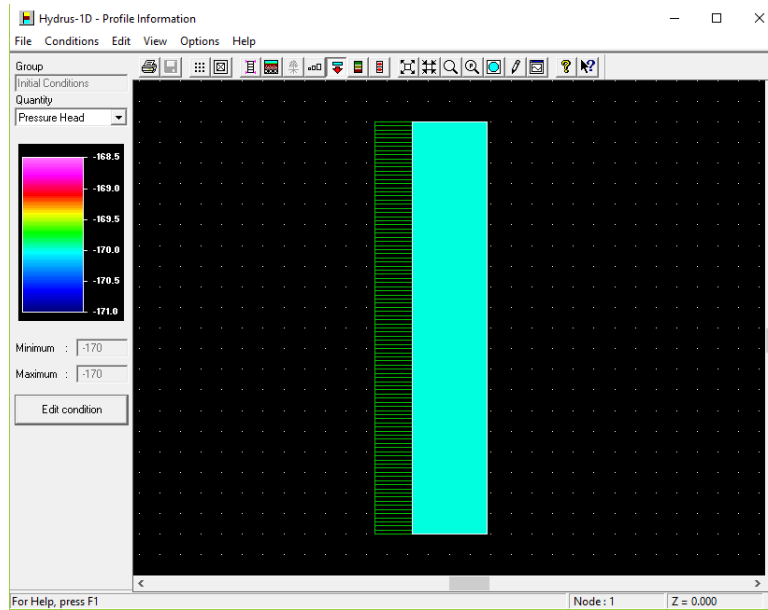


Figura B. 6: Condiciones iniciales de presión matricial.

### Condiciones de contorno

Respecto a la información sobre el crecimiento de la caña se han introducido 15 puntos en el ciclo de la planta. Los datos, proporcionados por Cenicaña, se muestran en la Tabla B.1

Tabla B. 1: Datos introducidos en el modelo respecto el crecimiento de la caña de azúcar.

Puntos	Tiempo [días]	Altura caña [cm]	Albedo [-]	LAI/SCF [-]	Raíces [cm]
1	22	15	0.23	0.16	20
2	56	25	0.23	2	40
3	78	35	0.23	3.1	50
4	98	60	0.23	3.6	60
5	141	100	0.23	4.4	60
6	176	150	0.23	4.9	60
7	210	200	0.23	5	70
8	245	240	0.23	5	80
9	287	300	0.23	5	100
10	332	320	0.23	5	100
11	364	335	0.23	5	100
12	384	350	0.23	4.5	100
13	413	365	0.23	2	100
14	441	375	0.23	1	100
15	490	400	0.23	0	100

## ANEJO C. ARCHIVOS HYDRUS-1D

Este anejo recoge un ejemplo del archivo FIT.OUT, con toda la información generada por HYDRUS-1D de la mejor simulación obtenida, es decir, del calibrado manual con los parámetros de Feddes modificados.

```
*****
*                                     *
*                                     *
*Welcome to HYDRUS-1D               *
*                                     *
*                                     *
*****
```

### Program parameters

```
=====
```

```
Max. iterations.....(MIT)..... 20
No. of observations.....(NOBb)..... 909
```

### Soil hydraulic properties

```
=====
```

```
Residual moisture content.....(WCR)..... 0.050
Saturated moisture content.....(WCS)..... 0.450
First coefficient.....(ALPHA)..... 0.200
Second coefficient.....(N)..... 1.810
Saturated conductivity.....(CONDS)..... .1540E+03
Pore connectivity factor.....(L)..... 0.500
```

### Soil hydraulic properties

```
=====
```

```
Residual moisture content.....(WCR)..... 0.010
Saturated moisture content.....(WCS)..... 0.450
First coefficient.....(ALPHA)..... 0.260
Second coefficient.....(N)..... 1.280
Saturated conductivity.....(CONDS)..... .9500E+02
Pore connectivity factor.....(L)..... 0.500
```

### Soil hydraulic properties

```
=====
```

```
Residual moisture content.....(WCR)..... 0.012
Saturated moisture content.....(WCS)..... 0.420
First coefficient.....(ALPHA)..... 0.050
Second coefficient.....(N)..... 1.280
Saturated conductivity.....(CONDS)..... .2640E+03
Pore connectivity factor.....(L)..... 0.500
```

### Parameter estimation with the 1. initial estimate

```
=====
```

Iteration	SSQ	ALPHA	CONDS	ALPHA	CONDS	ALPHA	CONDS
0	0.1040D+01	0.2000E+00	0.1540E+03	0.2600E+00	0.9500E+02	0.5000E-01	0.2640E+03
1	0.9500D+00	0.8966E-01	0.3000E+03	0.2719E+00	0.1401E+03	0.5000E-01	0.2519E+03
2	0.9047D+00	0.9114E-01	0.3000E+03	0.2751E+00	0.1460E+03	0.5000E-01	0.3566E+03
3	0.8986D+00	0.9023E-01	0.3000E+03	0.2747E+00	0.1479E+03	0.5000E-01	0.3864E+03
4	0.8832D+00	0.1013E+00	0.3000E+03	0.2713E+00	0.1455E+03	0.5000E-01	0.4238E+03
5	0.8566D+00	0.1315E+00	0.3000E+03	0.2076E+00	0.1145E+03	0.5000E-01	0.5142E+03
6	0.8138D+00	0.2425E+00	0.3000E+03	0.1101E+00	0.4000E+02	0.5678E-01	0.7682E+03
7	0.8119D+00	0.2432E+00	0.3000E+03	0.1110E+00	0.4000E+02	0.5645E-01	0.7668E+03

Mass balance error in FE solution during final run was 0.3296 %

Correlation matrix

```
=====
      1      2      3      4      5      6
1  1.0000
2 -0.0169  1.0000
3 -0.7557 -0.3751  1.0000
4 -0.7676 -0.3616  0.9951  1.0000
5 -0.1933  0.1019  0.1374  0.1401  1.0000
6 -0.1774  0.1174  0.1241  0.1246  0.9938  1.0000
```

Non-linear least-squares analysis: final results

```
=====
                        95% Confidence limits
Variable   Value   S.E.Coeff.  Lower   Upper
ALPHA  0.24315E+00  0.23717E-01  0.19660E+00  0.28970E+00
CONDS  0.30000E+03  0.67448E+02  0.16762E+03  0.43238E+03
ALPHA  0.11098E+00  0.16890E-01  0.77831E-01  0.14413E+00
CONDS  0.40000E+02  0.14020E+02  0.12485E+02  0.67515E+02
ALPHA  0.56454E-01  0.21033E-01  0.15173E-01  0.97735E-01
CONDS  0.76680E+03  0.68575E+03 -0.57907E+03  0.21127E+04
```

Contributions to the final objective function

Measurement Set 1: 0.8119E+00

RSQUARE for regression of predicted vs observed =0.46395

Mean Weighted Error, ME : -0.7717E-02  
Mean Weighted Absolute Error, MAE : 0.2009E-01  
Root Mean Square Weighted Error, RMSE : 0.2990E-01

Akaike Information Criterion, AIC : -0.6368E+04  
Bayesian Information Criterion, BIC : -0.6339E+04

```
-----Observed & Fitted Quantity -----
                        Resi-
No  Time      Obs      Fitted      dual Type Position
1  172.000 -133.10001 -22.96388 -110.13612 1 1
4  173.000 -92.30000 -24.12889 -68.17111 1 1
****
*****
845 458.000 -113.90000 -222.78812 108.88811 1 3
```